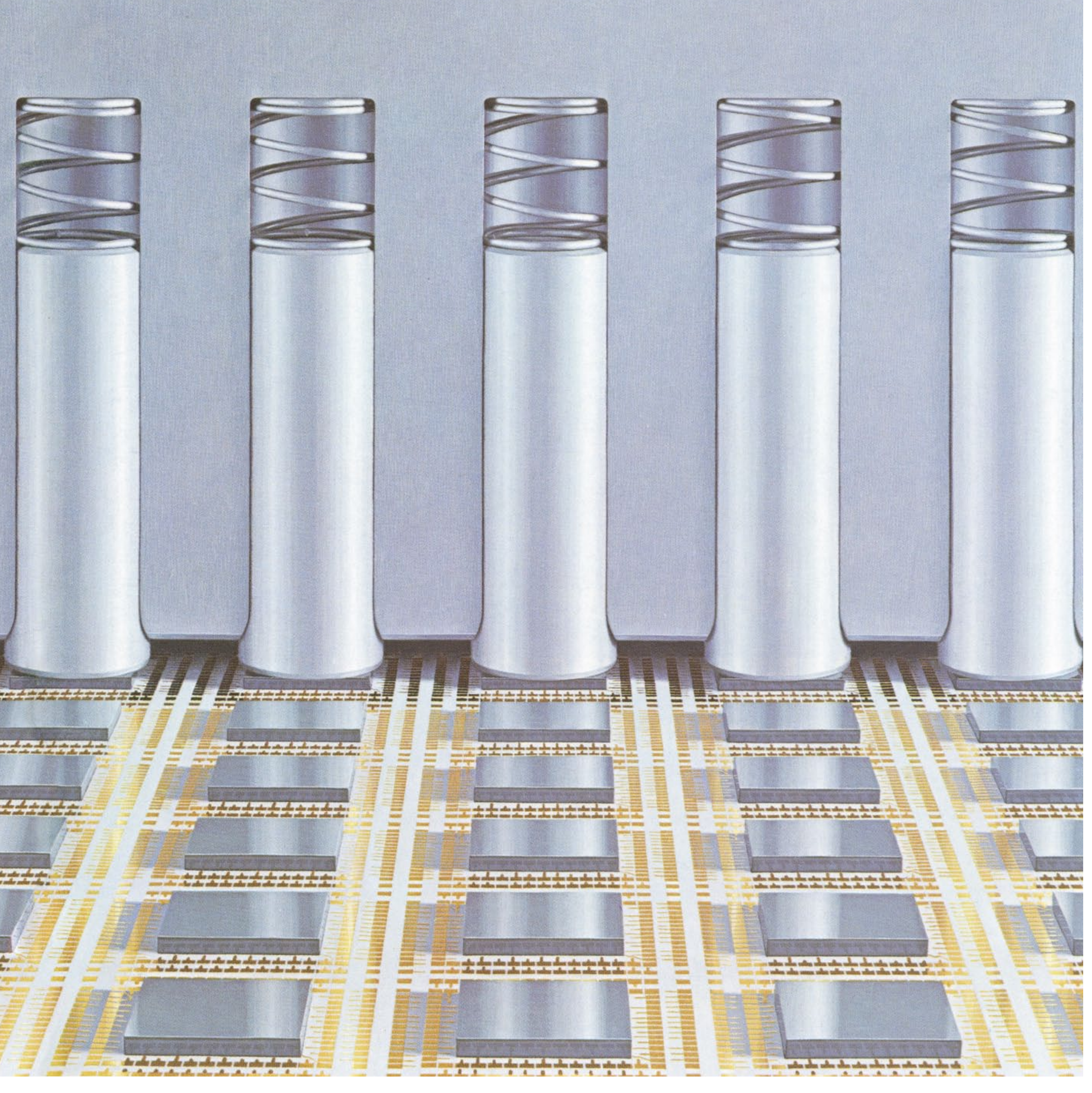
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



EMPAQUETAMIENTO MICROELECTRONICO

Septiembre 1983
350 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 84
Septiembre 1983

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

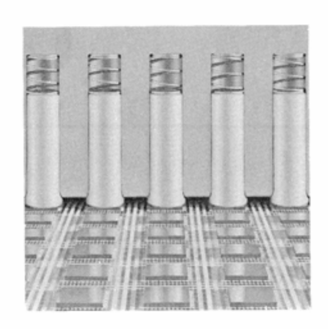
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Andrés Pocoví Juan: *Así se parten los continentes*; Joandomènec Ros: *Piscicultura de los salmónidos*; Jesús Palomeque: *El aprendizaje de un caracol marino*; A. García Rodríguez: *Empaquetamiento microelectrónico*; Ricardo Sánchez Tamés: *Desarrollo de las hojas de palmeras*; August Palanques Mestre: *Partículas con belleza desnuda*; J. M. García de la Mora: *Lenguas criollas*; Luis Bou: *Temas metamágicos*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Libros:

Ramón Margalef, José M.ª Tous, Agustín Albarracín, Antonio Méndez y Miguel Alcaraz



LA PORTADA

Las columnas que se levantan sobre el suelo de mosaico que se reproduce en la figura de la portada forman parte de un módulo de enfriamiento que aloja más de 100 "pastillas" de silicio de la unidad central de proceso de un ordenador digital de gran tamaño. Las pastillas están montadas con la cara hacia abajo, sobre una placa de cerámica dotada de 12.000 terminales. Las columnas o pistones ejercen una presión sobre la parte posterior de las pastillas con el fin de extraer el calor que se genera en ellas. La técnica utilizada para interconectar y enfriar los distintos dispositivos microelectrónicos constituye el principal factor limitante del funcionamiento de los procesadores centrales en muchos ordenadores (véase "Empaquetamiento microelectrónico", por Albert J. Blodgett, Jr., en este mismo número). El módulo que se reproduce en esta figura ha sido construido por la International Business Machines Corporation (IBM).

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 3.850 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 52 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
350 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
450 pesetas

Distribución para España
Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49 - Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - Madrid-30
Tel. 430 84 81
Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.º - Barcelona-34
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de portada de Marvin Mattelson

Página	Fuente	Página	Fuente
8-9	Luis F. Rodríguez y J. Cantó		Marina, Woods Hole,
10-11	Miguel Alonso, L. F.		Massachusetts (*arriba*);
	Rodríguez y J. Cantó		Jerome Kuhl (*abajo*)
12	L. F. Rodríguez y	47-52	Jerome Kuhl
	J. Cantó (*arriba*)	55	International Business
13-15	Miguel Alonso, L. F.		Machines Corporation
	Rodríguez y J. Cantó	56-59	Gabor Kiss
16	L. F. Rodríguez y J. Cantó	60	International Business
17-18	Miguel Alonso, L. F.		Machines Corporation
	Rodríguez y J. Cantó	61-63	Gabor Kiss
20	Servicio Geológico de	64	International
	los Estados Unidos		Business Machines
22-23	Andrew Tomko		Corporation
24	Andrew Tomko (*arriba*);	65	Gabor Kiss
	Vincent Courtillot	66	IBM
	(*abajo*)	69	© Walter Chandoha
25-28	Andrew Tomko	70	Ilil Arbel
30	Weststock	71-72	Donald R. Kaplan,
32	Enid Kotschnig		Universidad de
34-36	Sally Black		California en Berkeley
37	Universidad de Washington	73	Ilil Arbel
38	Lauren R. Donaldson,	74-75	Donald R. Kaplan,
	Facultad de Ciencias		Universidad de
	Oceánicas y Pesqueras de la		California en Berkeley
	Universidad de Washington	77	Allen Beechel
43	Pierre A. Henkart,	78	Edward Bell
	Instituto Nacional	79-86	Allen Beechel
	del Cáncer (*arriba*);	89	Colección de Ray
	Alan M. Kuzirian,		Jerome Baker y
	Laboratorio de Woods Hole		Robert E. Van Dyke
	(*abajo*)	90	Ilil Arbel
44	Jerome Kuhl	91-94	Edward Bell
45-46	Daniel L. Alkon,	96-104	William S. Huff
	Laboratorio de Biología	105-110	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - Barcelona-5
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S. A.
Napoles, 249 - Tel. 207 40 11
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

LUIS F. RODRIGUEZ y JORGE CANTO ("Los objetos Herbig-Haro") se dedican al estudio de los objetos gaseosos que existen en el espacio interestelar. Luis F. Rodríguez se doctoró por la Universidad de Harvard en 1978, especializándose en radioastronomía observacional. A partir de 1979 se incorporó como investigador titular al Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Por sus trabajos sobre el centro de la Vía Láctea compartió, en 1980, con James Liebert el premio "Robert J. Trumpler" que cada año otorga la Sociedad Astronómica del Pacífico a tesis doctorales consideradas destacadas. Desde el mismo año es director del Instituto de Astronomía de la UNAM. Jorge Cantó se doctoró en la Universidad de Manchester en 1979. Su especialidad es la hidrodinámica del medio interestelar, en particular los flujos supersónicos y las ondas de choque. En 1979 se incorporó al Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México como investigador titular. Actualmente es jefe del departamento de astrofísica teórica de dicho centro.

VINCENT COURTILLOT y GREGORY E. VINK ("Así se parten los continentes") son geofísicos que trabajaban independientemente en el tema de su artículo antes de colaborar para su redacción. Courtillot es profesor de geofísica y director del departamento de ciencias de la tierra de la Universidad de París. Se licenció por la Escuela de Minas de París. Prosiguió estudios en los Estados Unidos, licenciándose en geofísica por la Universidad de Stanford en 1972. De regreso a Francia, se recibió de doctor en geofísica, en 1977, por la Universidad de París. Vink se licenció por la Universidad de Princeton. Completó el segundo ciclo universitario en la de Colgate. Su tesis doctoral versará sobre la evolución tectónica del mar de Noruega-Groenlandia y del océano Artico.

LAUREN R. DONALDSON y TIMOTHY JOYNER ("La piscicultura de los Salmónidos") son expertos en pesquerías. Donaldson es profesor emérito de la Universidad de Washington. Estudió ciencias en el Intermountain Union College; se licenció y doctoró por la Universidad de Washington. Su contribución al amplio programa de pesquerías de la Universidad de Washington es notable. Desarrolló una población reproductora de trucha arco iris con tasas de crecimiento, supervivencia y producción de huevos más de 20 veces superiores a las de las poblaciones trucheras anteriores. Dirigió los trabajos que establecieron cardúmenes de salmones y de trucha irisada marisca en los estanques universitarios. Joyner se doctoró en pesquerías en 1962. Inició su carrera en la Universidad de Brown. Durante la segunda guerra mundial sirvió en la Infantería de Marina estadounidense desplazada al Pacífico. Tras su doctorado trabajó para el Servicio Nacional de Pesquerías Marinas, denominado entonces Oficina de Pesquerías Marinas. Se jubiló en 1975.

DANIEL L. ALKON ("El aprendizaje de un caracol marino") tiene bajo su responsabilidad la sección de sistemas nerviosos del Instituto Nacional de Trastornos Neurológicos y Comunicativos de los Estados Unidos. Es miembro del Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole, Massachusetts, donde tiene su laboratorio. En 1965 se licenció en ciencias por la Universidad de Pennsylvania. Se doctoró en medicina, en 1969, por la Facultad de Medicina de Cornell. Alkon se interesa por la investigación en neurofarmacología, fisiología sensorial y comportamiento animal.

ALBERT J. BLODGETT, JR. ("Empaquetamiento microelectrónico") dirige el laboratorio de investigación del Centro de la producción Thomas J. Watson de la International Business Machines Corporation (IBM). En 1960 se licenció en ingeniería eléctrica, por la Universidad de Yale. Ese mismo año se incorporó al laboratorio de desarrollo de nuevos productos de la IBM. Dos años más tarde se trasladó a la Universidad de Stanford, como becario residente de la IBM, por la que se doctoró en ingeniería eléctrica; en 1966 se reincorporó a la IBM. Entre otros proyectos, Blodgett fue el responsable del diseño de los módulos lógicos básicos del ordenador S/360 y del desarrollo de los módulos de cerámica de capas múltiples utilizados en las unidades de proceso de datos de las series 43XX y 308X.

DONALD R. KAPLAN ("El desarrollo de las hojas de palmera") enseña botánica en la Universidad de California en Berkeley. Se licenció en 1960 por la del Noroeste. En 1965 se recibió de doctor en Berkeley. Ese mismo año trabajó en el Real Jardín Botánico de Kew, Inglaterra, becado por la Fundación Nacional de la Ciencia. De retorno a los Estados Unidos se incorporó al departamento de biología de los organismos de la Universidad de California en Irvine.

NARIMAN B. MISTRY, RONALD A. POLING y EDWARD H. THORNDIKE ("Partículas con belleza desnuda") se hallan encuadrados en un grupo de 75 físicos, pertenecientes a siete universidades, empeñado en la investigación de la física de los mesones con belleza con el detector CLEO, en el Anillo de Almacenamiento de Electrones de Cornell (CESR). Mistry procede del Laboratorio Newman de Estudios Nucleares de la Universidad de Cornell. Nacido en la India, estudió en la Universidad Javeriana de Bombay. Llegó a los Estados Unidos en 1958 para continuar su formación en física; la Universidad de Columbia le concedió el doctorado en 1963. Poling es investigador asociado de física y astronomía de la Universidad de Rochester. Completó su licenciatura en 1976 en la Universidad del Estado de Nueva York en Búfalo, doctorándose por Rochester en 1981. Thorndike es catedrático de física en Rochester. Se licenció por la Universidad Wesleyan en 1956; en 1957 completó el segundo ciclo universitario en Stanford. Es doctor en física (1960) por la Universidad de Harvard. Desde 1981 es portavoz del grupo que trabaja con CLEO.

DEREK BICKERTON ("Lenguas criollas") escribe: "Obtuve mi título de Bachiller en Artes por la Universidad de Cambridge en 1949, pero no empecé mi carrera académica hasta 1964, año en el que enseñé literatura inglesa en el Colegio Universitario de Cape Coast, Ghana. Los cursos 1966 y 1967 los pasé estudiando lingüística en la Universidad de Leeds, y luego di clases de lengua inglesa en la Universidad de Guyana, donde permanecí cuatro años. Enseñé por breve tiempo en la Universidad de Lancaster, en Inglaterra, y entré a formar parte del claustro de la Universidad de Hawai en Manoa por el otoño de 1972. Me doctoré en 1976. Desde aquel mismo año soy profesor con dedicación exclusiva en Hawai. También he escrito varias novelas, la más reciente de las cuales fue *King of the Sea* (Random House, 1980)."

Hace…

José M.ª López Piñero

… cuatrocientos cincuenta años

Falleció en Córdoba Fernán Pérez de Oliva, figura representativa del interés que tuvieron por la técnica los pensadores españoles del siglo xvi.

Nacido hacia 1494 en la misma Córdoba, Pérez de Oliva se formó en Salamanca, Alcalá, Roma y París. Tuvo como maestro, en esta última ciudad, al matemático Juan Martínez Silíceo, en cuyo honor escribió un *Dialogus inter Siliceum, Arithmeticam et Famam*. Más tarde fue catedrático de filosofía y teología en la Universidad de Salamanca, de la que llegó a ser rector.

Hacia 1530, desde su cátedra salmantina, se ocupó, según propia declaración, de "cosas muy nuevas y de grandísima dificultad, cuales han sido los tratados que yo he leído a mis oyentes escritos de *opere intellectus*, de *lumine et specie*, de *magnete* y otros do bien se puede haber conocido qué noticia tengo de la filosofía natural". Su principal interés no era, sin embargo, doctrinal sino aplicado. Llegó incluso a pensar en utilizar el magnetismo para la comunicación a distancia entre personas. "Pudiera también poner aquí –dice su sobrino Ambrosio de Morales en el prefacio a la edición de sus obras– lo que el Maestro Oliva escribió en latín de la piedra imán, en la cual halló grandes secretos. Mas todo era muy poco y estaba todo ello imperfecto y poco más que apuntado para proseguirlo después despacio, y tan borrado que no se entendía bien lo que agradaba o lo que reprobaba. Una cosa tengo que advertir aquí acerca desto. Creyóse muy de veras que por la piedra imán halló cómo se pudiesen hablar dos absentes… proponía la forma que en obrar se había de tener y cierto era sutil; pero siempre afirmaba que andaba imaginándolo, mas que nunca llegaba a satisfacerse ni ponerlo en perfección". Pérez de Oliva se ufanó, además, de su preparación en "arquitectura y perspectiva". Entre sus obras figura un *Razonamiento sobre la navegación del río Guadalquivir*, que pronunció en el ayuntamiento de Córdoba.

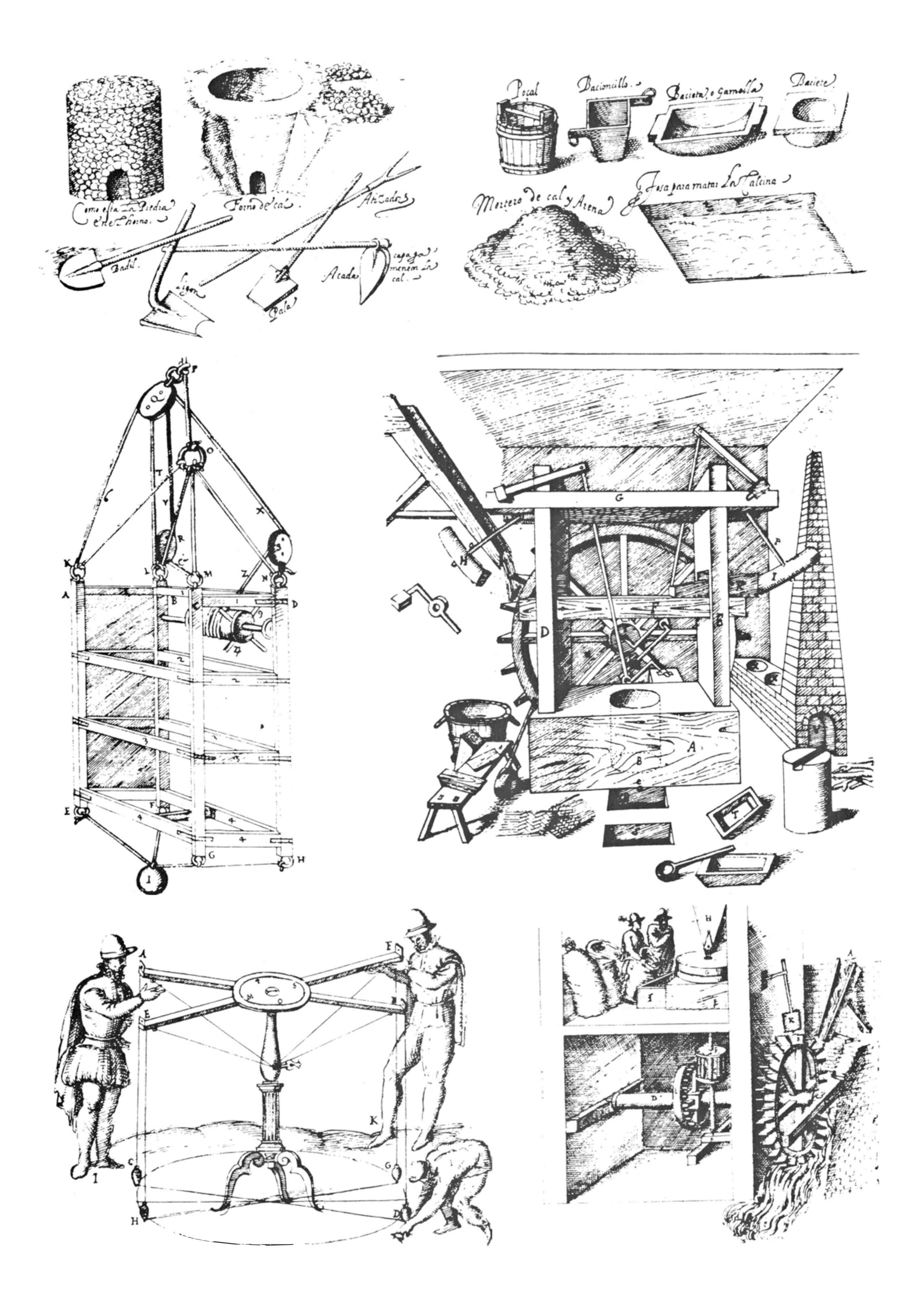
La consideración positiva de la técnica por parte de Pérez de Oliva estaba todavía explícitamente unida a la raíz voluntarista bajomedieval, es decir, a la consideración de que el hombre es un ser cuasi-creador "a imagen y semejanza" del Dios creador. Ello se refleja, por ejemplo, en su *Diálogo de la dignidad del hombre*, cuando el personaje que defiende los puntos de vista modernos del autor rebate las opiniones tradicionales de su interlocutor: "Los artifices que viven en las ciudades no tienen la pena que tu representabas, mas antes singular deleite… ¿Cuánto más te parece que sería mayor pena, que alguno en su entendimiento considerase alguna excelente obra, como fue el navío para pasar los mares o las armas para guardar la vida, si en sí no tuviese manera de ablandar el hierro, hender los maderos y hacerlas otras cosas que tú representas como enojos de la vida? Paréceme a mí que en mayor tormento viviera el hombre si las cosas usuales que viera con los ojos del entendimiento, no pudiera alcanzarlas con las manos corporales. Por eso, no condenes tales ejercicios como estos del hombre, antes considera que como Dios es conocido y alabado por las obras que hizo, así nuestros artificios son gloria del hombre, que manifiestan su valor".

La vigencia de la nueva valoración positiva de la técnica en la España de esta época se refleja en las obras de otros muchos pensadores. En una línea semejante a la de Pérez de Oliva, un teólogo como fray Luis de Granada afirmó en su *Introducción al símbolo de la fe* (1556): "Usando de la industria de las manos en las cosas de la naturaleza, habemos venido a fabricar otra nueva naturaleza".

Otros dos ejemplos destacados corresponden a *De disciplinis* (1531), el gran tratado epistemológico de Juan Luis Vives, y a *Apuntamientos de cómo se deben reformar las doctrinas, y la manera de enseñallas* (1589), el famoso texto pedagógico de Pedro Simón Abril. En el primero de ellos, Vives exhortó a los intelectuales a prestar seria atención a los problemas técnicos, a las "artes y descubrimientos humanos en lo que toca y atañe a la alimentación, al vestido, a la vivienda; en esta tarea le ayudarán los tratadistas de agricultura y los que estudian la naturaleza y las propiedades de las hierbas y los animales y los que trataron de arquitectura… las artes de tracción animal en que andan mezclados el caballo, el mulo, el buey y toda suerte de vehículos, así como el arte vecina de la navegación". El hombre culto, según Vives, "no debe tener empacho de acudir a las ventas y a los obradores, y preguntar y aprender de los artesanos las peculiaridades de su profesión; porque de muy atrás desdeñaron apearse a este plano y se quedaron sin saber una porción incalculable de cosas que tanta importancia tienen para la vida". Por su parte, Pedro Simón Abril consideró en sus *Apuntamientos* que "es cosa realmente digna de dolor que, en tanta hacienda como se gasta en las públicas escuelas, no haya doctrina ninguna de tres cosas que tan necesarias son para la vida, que son: el agricultura, el arquitectura y el arte militar, habiendo tantas liciones de vanas sofisterías, las cuales, quien las sabe no sabe nada por sabellas, ni por ignorallas ignora nada el que no las sabe". Del mismo modo que Vives, Simón Abril no se limitó a subrayar el interés práctico de la técnica, sino que destacó su rango intelectual: "En la filosofía natural es grave error enseñar las cosas de la naturaleza, así en común y general, sin descender a lo particular, y especialmente a la materia de agricultura, que es una de las mejores partes de la filosofía natural".

Otro aspecto de la nueva valoración de la técnica en la España del siglo xvi fue la conciencia que de su importancia tuvieron sus mismos cultivadores. El prestigio de lo práctico, presente en innumerables textos, se presenta de forma muy expresiva en el tratado de ciru-

Diferentes aspectos de la técnica en la España del siglo xvi. Figuras de Los Veinte y Un Libros de los Ingenios y Máquinas, *gran tratado de ingeniería hidráulica atribuido a Juanelo Turriano hasta las recientes investigaciones de José Antonio García Diego, que han demostrado que fue obra de un ingeniero aragonés de la segunda mitad del siglo xvi, todavía no identificado*



Como esta la Piedra en el horno.
Forno de cal
Atizadors
Badil.
Ligon
Pala
Acada
capaça menem la cal.
Poçal
Bacioncillo.
Bacieta, o Garnella
Baciete
Mortero de cal y Arena
Fosa para matar la Calcina

gía (1582), de Dionisio Daza Chacón, cirujano de los ejércitos de Carlos I. "Muy poco me delitan –afirma– los médicos que demasiadamente se entretienen en la filosofía natural, y no llegan al remedio de los rendidos a la enfermedad. Acaéceles a éstos lo que a las higueras locas, que convidan con su verdor y frescura a cualquiera que las mira y, llegados a ellas, por su esterilidad las maldicen. Esta fue la razón que me movió a escribir cosas más de provecho que de especulación." La diferencia existente entre el cirujano medieval, reducido a un artesano de condición servil por dedicarse a una ocupación manual y la vigorosa conciencia moderna de Daza se refleja muy bien en su afirmación de que "destas tres partes de la medicina, la más antigua, la más noble, la más difícil, la más cierta de todas, es la cirugía". Lejos de considerar su actividad como una función de segundo rango, dice arrogantemente que "el buen cirujano es el verdadero médico". Su superioridad reside precisamente en el carácter práctico de su ocupación: "La cirugía práctica, o agente, o factiva, como la quisiéredes llamar, es la verdadera cirugía, porque es saber poner por obra y ejercitar y hacer con las manos y con los instrumentos lo que el otro no supo muy bien parlar. Y ésta se pone entre las artes mecánicas, y no se alcanza ni puede uno ser perfecto en ella si no la hubiera ejercitado muchos años".

Parecida postura ante la técnica encontramos en la mayor parte de los textos españoles de este siglo sobre cirugía, arte de navegar, ingeniería, artillería o arte de los metales. Al mismo tiempo, todos ellos destacan de diversas maneras la eficacia de la técnica basada en conocimientos científicos frente a la práctica meramente empírica. Daza tiene buen cuidado de subrayar la ventaja del cirujano con formación universitaria. El ingeniero y cosmógrafo Andrés García de Céspedes cuenta en su tratado "de conducir aguas" (1606) que la ciudad de Burgos encargó la construcción de una fuente a un tal Martín del Haya que, no sólo carecía de la necesaria preparación científica, sino que despreció los consejos y normas que el propio García de Céspedes le dio. El resultado fue una fuente inútil, "gastando en balde el tiempo y el dinero". Otra cosa semejante ocurrió en Lisboa con un portugués, quedando igualmente "corridos de vergüenza" con el fracaso. En su tratado de náutica (1551), Martín Cortés denuncia los desastres y peligros que ocurren en el mar, causados "por la ignorancia y falta de experimentados pilotos, de los que es de doler, no tanto porque no saben como porque, pudiendo, no quieren ni procurar saber". El capitán Bernardino Barroso, en el proemio de un compendio de arte militar titulado significativamente *Teórica práctica* (1622), afirma: "También doy una parte, o por mejor decir, arte muy importante y necesario, que es la aritmética [...] de tal manera que el oficial que la ignora y quiere cumplir con su obligación, lo tengo por tan imposible como lo sería al que quiere ver sin ojos, andar sin pies y pelear sin manos".

Los objetos Herbig-Haro

Nubecillas de gas caliente en proceso de enfriamiento, tras haber sido calentadas e ionizadas por el paso de una onda de choque. Su fuente última de energía reside en una estrella joven y lejana

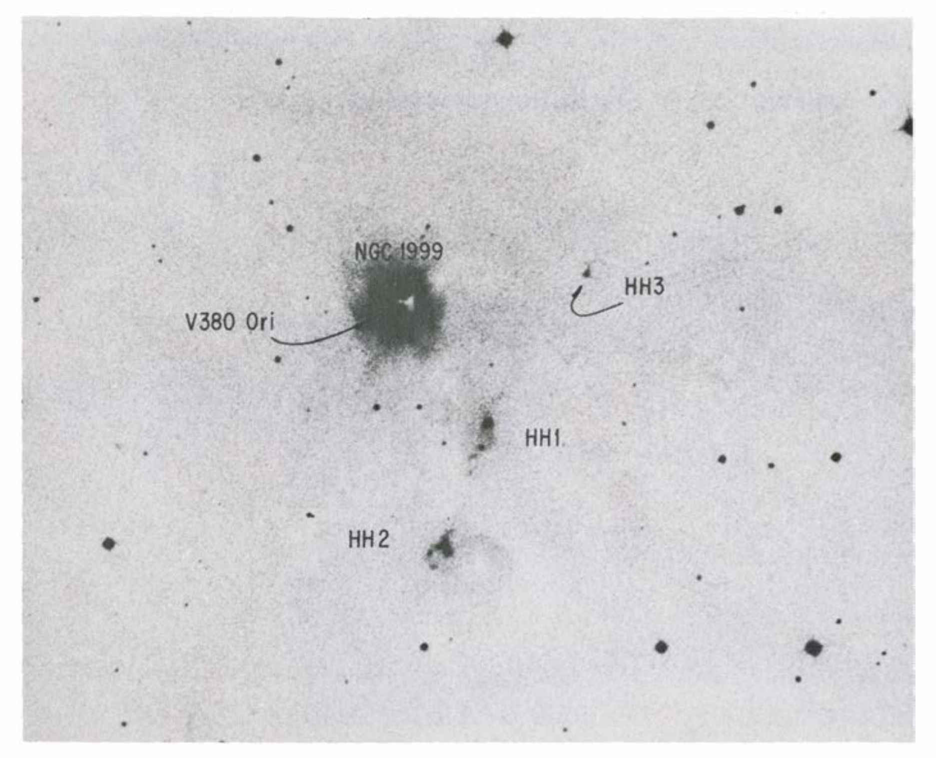
Luis F. Rodríguez y Jorge Cantó

Los científicos, astrónomos incluidos, consumen la mayor parte de su tiempo en profundizar en los detalles que nos llevan a un conocimiento cada vez más completo de objetos cuya naturaleza básica se domina bastante bien. Son pocos los astrónomos que han pasado por la experiencia de descubrir una nueva clase de fenómenos o de objetos que realmente requiera abrir un nuevo capítulo en los anales de su disciplina. A principios de la década de los cincuenta, los astrónomos George Herbig y Guillermo Haro gozaron de esa experiencia. Los objetos Herbig-Haro, como se llama ahora, en su honor, a los que ellos descubrieron de manera independiente, mantuvieron perplejos a los astrónomos por tres décadas y hasta recientemente no hemos comenzado a comprender por qué se forman, cómo evolucionan y cuál es su relación con el proceso de gestación de nuevas estrellas.

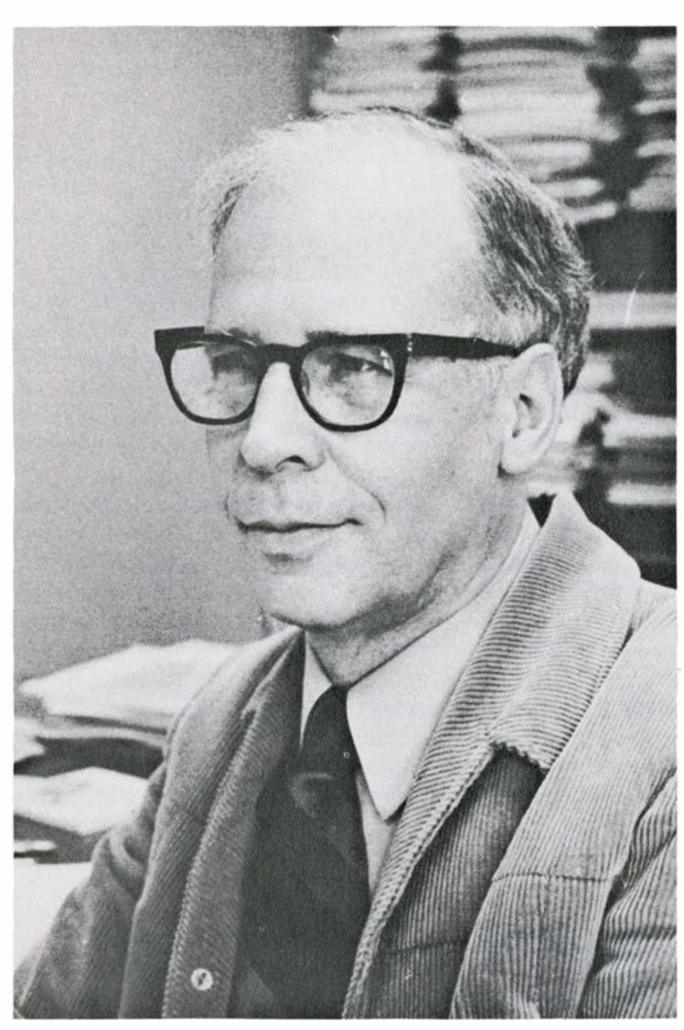
Herbig y Haro han dedicado buena parte de su actividad astronómica al estudio de estrellas de formación reciente; interés que, en cierto modo, les llevó al descubrimiento de los objetos Herbig-Haro. Es un postulado ampliamente aceptado que las nuevas estrellas se forman a partir del gas libre que existe en el espacio interestelar constituyendo a modo de "nubes" gigantescas. Estas nubes, muy frías (su temperatura es del orden de 10 grados Kelvin) constan principalmente de hidrógeno molecular, algo de helio y pequeñas cantidades de monóxido de carbono, amoníaco, vapor de agua y otras moléculas. Típicamente, las nubes moleculares tienen dimensiones de varios parsecs (1 parsec equivale a $3{,}1 \times 10^{18}$ centímetros) y masas de miles de veces la del Sol (1 masa solar = $2{,}0 \times 10^{33}$ gramos). Poseen, pues, la materia prima de la cual nacerá no sólo una estrella, sino cúmulos enteros de ellas.

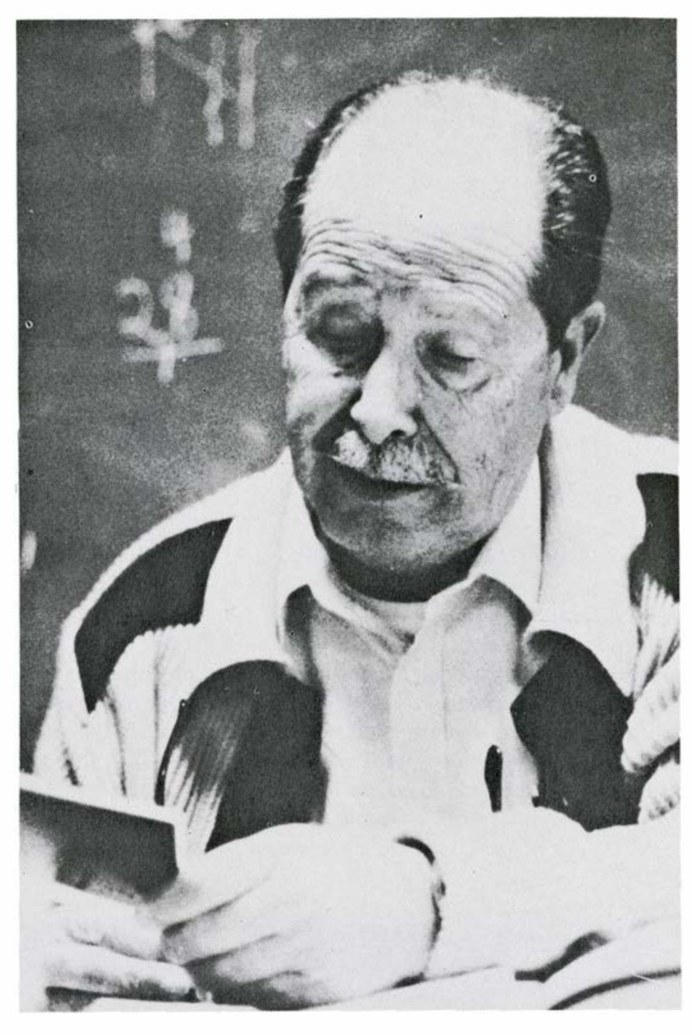
Se supone también que la formación de la nueva estrella o estrellas ocurre cuando una nube molecular sale del equilibrio hidrostático en que se encuentra; se comprime entonces y, en puntos de la misma, comienza un proceso de contracción gravitacional. Esta compresión inicial puede venir instada por varios mecanismos. En la onda de choque espiral, que caracteriza a las galaxias espirales, como la nuestra, hallamos el mecanismo mejor conocido. Las estrellas con masas varias veces la solar surgen, en gran número, en virtud de la contracción iniciada por la onda de choque espiral [*véase la figura 3*]. Por contra, las estrellas cuya masa se equipara a la del Sol, o son más ligeras, parecen formarse en un proceso casi continuo en el tiempo. A propósito de éstas, Colin Norman, de la Universidad de Leiden, y Joseph Silk, de la de California en Berkeley, han postulado la existencia, en las nubes, de un mecanismo autorregulador mediante el cual el viento estelar de las estrellas ya formadas acarrea y apila gas circundante hasta que, a su vez, este gas se hace gravitacionalmente inestable y se contrae para originar nuevas estrellas [*véase la figura 4*].

De cualquier manera, y al hilo de la argumentación anterior, esperamos que las estrellas de reciente formación se encuentren asociadas todavía espacialmente con las grandes nubes moleculares de las que se constituyeron. Una vez formadas, las estrellas se mantienen prácticamente inmóviles respecto a la nube materna. Sin embargo, por variaciones al azar pueden adquirir una velocidad del orden de un kilómetro por segundo (pequeña, pues, astronómicamente hablando) que hace que la



1. LOS TRES PRIMEROS OBJETOS HERBIG-HARO descubiertos. NGC 1999 es una nebulosa de reflexión cuya estrella iluminadora V380 Orionis se encuentra proyectada contra la nebulosa. Esta fotografía fue tomada con el mismo telescopio que usó Haro en Tonantzintla, para identificar a los objetos.






2. FOTOGRAFIAS RECIENTES de George Herbig (*izquierda*) y Guillermo Haro (*derecha*), descubridores, a principios de la década de los cincuenta y de manera independiente, de los objetos que llevan su nombre. Ambos se han mantenido muy activos, haciendo otras contribuciones a la astronomía.

estrella se desplace lentamente hasta abandonar la nube en tiempos característicos de varios millones de años. Así, cuando se observa una estrella embebida en una nube molecular, o en su vecindad, es razonable suponer que, si no se trata de una intrusa, no habrá cumplido los diez millones de años de edad: una estrella sumamente joven, pues. Y si es de tipo solar, sólo habrá cruzado una milésima parte de su vida total. Stephen Strom, de la Universidad de Arizona, define expresivamente esta etapa cuando afirma que la estrella se halla aún asociada a su material placentario.

A fines de los cuarenta Herbig y Haro estudiaban las estrellas cercanas o asociadas con nubes moleculares, Herbig desde el Observatorio de Lick en California y Haro desde el Observatorio de Tonantzintla en México.

En el transcurso de esta investigación ambos notaron la presencia en una región del cielo de tres objetos de aspecto nebuloso cuyo espectro resultaba peculiar. Se encontraban cerca de la nebulosa de reflexión NGC 1999, en el complejo de nubes moleculares denominado Taurus-Auriga. La peculiaridad de estos objetos radicaba no tanto en su apariencia nebulosa como en su espectro. Al compararlo con el de las estrellas de la misma región, los espectros eran totalmente distintos. En palabras de Herbig: "Estos espectros son sumamente peculiares por varias razones: *a*) las líneas prohibidas (producto de la desexcitación de un nivel metaestable) de S II (azufre una vez ionizado) son muy intensas; *b*) se observan líneas prohibidas que cubren un amplio rango de energías de excitación (definida como la suma del potencial de ionización del ion correspondiente más el potencial de excitación del nivel emisor), que van desde las emitidas por el O I (2 electronvolt) hasta las del O III y el Ne III (51 y 65 electronvolt); y *c*) los espectros, considerados globalmente, difieren por completo de los espectros de estrellas jóvenes (estrellas tipo T Tauri) que se encuentran en la misma nube molecular y en las otras nubes del complejo Taurus-Auriga".

El aspecto nebuloso de estos objetos se puede apreciar en la figura 1 tomada con el mismo telescopio que usó Haro para identificarlos por primera vez. Se trataba de los objetos Herbig-Haro, cuya numeración sigue la cronología de su descubrimiento. Los de la figura 1 se conocen como objetos Herbig-Haro números 1, 2 y 3 (o simplemente HH1, HH2 y HH3).

Herbig daría en 1969 una definición más precisa de los mismos: nebulosidades difusas muy peculiares, de tamaño pequeño (en torno a 0,01 parsec), con un espectro característico y dominado por líneas prohibidas muy intensas de O I, N II, S II y líneas de hidrógeno. Algunas veces un débil continuo se aprecia bajo las líneas de emisión. Estos objetos se encuentran siempre proyectados contra complejos de nubes moleculares o estrechamente relacionados con ellos.

Desde el momento mismo de su descubrimiento se notó que HH2 estaba constituido por varias subcondensaciones de aspecto semiestelar, es decir, muy compactas, conectadas entre sí por una nebulosidad difusa y sumamente débil. En la figura 5 se muestra una fotografía reciente de HH1 y 2 donde se

aprecia claramente la estructura de estos objetos. Con fines de identificación, a cada subcondensación de un mismo objeto se le denota por una letra. El diagrama de la figura 5 identifica las subcondensaciones que constituyen HH2.

La búsqueda e identificación de nuevos objetos HH continuó después del descubrimiento de los tres primeros. Hoy se conocen más de 70. Entre los investigadores que se han dedicado al rastreo de los mismos recordemos, amén de Haro y Herbig, a Steve y Karen Strom, del Observatorio Nacional de Kitt Peak, Richard Schwartz, de la Universidad de Missouri, Martin Cohen, del Centro de Investigación de la NASA en Ames, y Armen Gyulbudaghian, del Observatorio de Byurakan, Unión Soviética.

Desde el momento de su descubrimiento se reconoció una característica muy importante de esos objetos: carecían, al parecer, de una fuente propia de energía. Cualquier objeto que emite luz está perdiendo energía en los fotones emitidos. En la mayoría de los objetos cósmicos la fuente de energía última es una estrella de un tipo u otro. La nebulosa NGC 1999, por ejemplo, emite luz reflejando hacia nosotros la luz de la estrella V380 Orionis. En el caso de los objetos Herbig-Haro no se encontraba ninguna estrella a la que asignar el origen de la energía. En el decenio de los sesenta, Rudolph Minkowski y Haro acometieron una búsqueda exhaustiva de estrellas en HH1 y HH2 sirviéndose del telescopio de 5 metros de Monte Palomar. No encontraron ninguna. Pero los objetos HH seguían allí emitiendo luz, en aparente violación del principio de la conservación de la energía.

Aludimos antes a otro aspecto intrigante de estos objetos: el de su espectro. El propio Herbig, en su artículo pionero, llamaba la atención en el sentido de que el único otro objeto conocido por él (y por el resto de la comunidad científica del momento) cuyo espectro remedaba el de los HH era la nebulosa de emisión que rodea a la estrella T Tauri, descubierta por S. W. Burnham a fines del siglo pasado. En este caso, y aún suponiendo que T Tauri fuera la fuente de excitación de la nebulosa de Burnham, había serias dificultades para entender la naturaleza de esta nebulosa.

Existen en el universo otros tipos de nebulosas, más comunes y mejor comprendidas que los objetos en cuestión. Las nebulosas brillantes productoras de líneas de emisión están constituidas por gas (principalmente hidrógeno con un diez por ciento de átomos de helio y trazas de oxígeno, nitrógeno, etcétera) en diversos estados de ionización. Las líneas permitidas (es decir, las producidas por desexcitación de un nivel no metaestable) suelen deberse al proceso de recombinación de electrones libres con los iones presentes en el gas. Por otro lado, las líneas prohibidas son producto de la desexcitación de niveles metaestables que han sido previamente excitados por la colisión del átomo con un electrón libre. La emisión de las nebulosas brillantes está constituida fundamentalmente por una combinación de líneas permitidas y prohibidas, cuya intensidad nos informa sobre la temperatura, densidad y composición química del gas.

Las nebulosas brillantes comunes se agrupan en dos grandes categorías, que se dividen en virtud de la naturaleza del mecanismo que las energiza. La primera categoría está formada por las nebulosas fotoionizadas a las que una estrella muy caliente (temperatura superior a los 30.000 grados Kelvin) fotoioniza y calienta con su radiación ultravioleta. En esta categoría se encuentran las regiones HII (hidrógeno ionizado) alrededor de estrellas jóvenes calientes y las nebulosas planetarias, que son volutas de gas eyectadas por una estrella vieja. La expresión "nebulosas planetarias" tiene que ver con su apariencia en telescopios poco potentes: ofrecen una morfología redonda y verdosa, aunque no guardan relación alguna con los planetas. En las nebulosas fotoionizadas, la fuente de energía es una estrella central que proporciona gran cantidad de radiación ultravioleta.

El otro tipo de nebulosas brillantes dispone de una fuente de energía muy diferente: las remanentes de supernova, vale decir, el gas eyectado durante la explosión de una supernova. Es la supernova uno de los fenómenos cataclísmicos más espectaculares de la naturaleza. Se inicia con el colapso violento (que ocurre en breves segundos) del núcleo de una estrella. El colapso explosivo da como resultado la generación violenta de energía que se deposita, en forma de energía cinética, en la envolvente de la estrella, lanzándola hacia el medio interestelar a velocida-

a b c d

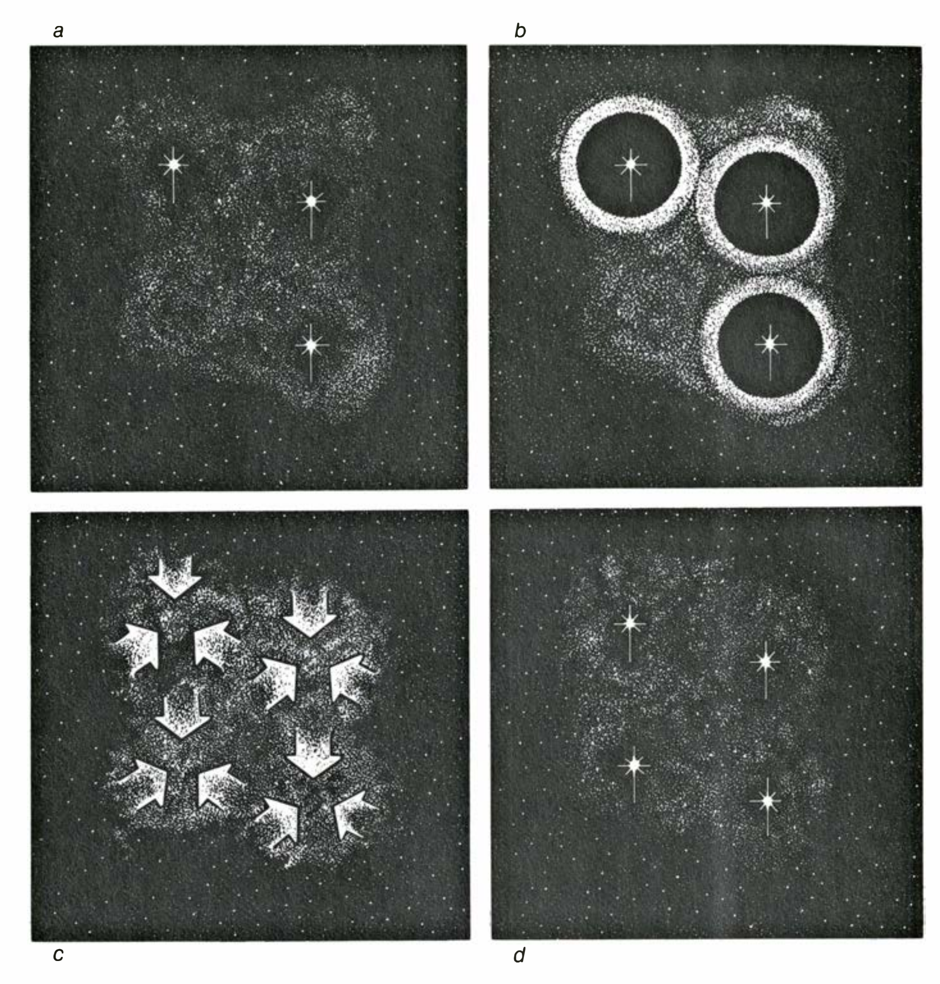
3. FORMACION DE ESTRELLAS MASIVAS. Se supone que la formación de una estrella ocurre cuando una nube molecular interestelar sale del equilibrio hidrostático en que se encontraba (*a*). La onda espiral galáctica saca de ese equilibrio a la nube molecular y comienza la contracción gravitacional (*b*). A lo largo de ésta, la nube se fragmenta; cada fragmento, inestable, se contrae (*c*), y origina una estrella con masa varias veces la solar, dejando atrás parte del material de la nube como remanente (*d*).

des del orden de miles de kilómetros por segundo. La energía liberada en la explosión de una supernova es del orden de 10^{51} erg, energía que sería suficiente para abastecer los requerimientos actuales de la humanidad a lo largo de un período de 10^{23} años. La envolvente de la estrella así eyectada se expande hacia el medio interestelar actuando a modo de pistón esférico y barriendo al material interestelar a través de una onda de choque. Al pasar la onda de choque sobre la materia interestelar, ésta se acelera hasta unas velocidades muy altas (cientos de kilómetros por segundo) y se comprime y calienta a temperaturas elevadísimas, del orden de 10^6-10^7 grados Kelvin. A estas temperaturas, el gas interestelar se ioniza rápidamente, por choques entre partículas, y produce fragmentos de material ionizado que se expanden a muy alta velocidad y constituyen la remanente de la supernova.

En contraste con las nebulosas fotoionizadas, las remanentes de supernova no obtienen su energía de la continua inyección de fotones ionizantes de la estrella excitadora, sino de la conversión paulatina de la energía cinética de la propia remanente a través de la onda de choque.

Para finales de los años cincuenta se había reconocido ya la naturaleza peculiar de los objetos HH. Su espectro difería del presentado por regiones fotoinizadas; en consecuencia, podía descartarse el mecanismo de fotoionización. Todavía más: un modelo de este tipo reclamaría la presencia de una estrella excitadora con una temperatura del orden de los 25.000 grados Kelvin, y, como comentamos, ninguna estrella había sido (ni ha sido) observada en contacto directo con estos objetos. Curiosamente, aun cuando los espectros de remanente de supernova eran en general diferentes de los que ofrecían los objetos HH, surgían entre ellos algunas similitudes inquietantes. Se investigó poco en ese sentido, quizá porque se consideró que una posible relación entre supernovas y objetos HH resultaría contradictoria: la supernova se origina durante la muerte de una estrella, los objetos HH durante su *nacimiento*.

En 1956, Karl Böhm, de la Universidad de Washington, exploró la posibilidad de que los objetos HH fueran estrellas en proceso de formación. La energía y radiación ionizante provendrían de la acreción de material sobre un objeto protoestelar. Este proceso era insuficiente, por varios órdenes de magnitud, para explicar la potencia liberada por estos objetos.



4. FORMACION DE ESTRELLAS SIMILARES AL SOL. Las estrellas cuya masa se equipara a la del Sol, o son más ligeras, se han formado en el interior de una nube molecular (*a*). El viento estelar acarrea y apila el gas circundante (*b*). El material apilado se hace gravitacionalmente inestable y se contrae para formar nuevas estrellas (*c*). El viento estelar de estas estrellas comienza de nuevo el proceso (*d*).

El estudio de los objetos HH vivió un largo período de aletargamiento hasta mediados de los años setenta. Hubo que esperar hasta 1974 para que Steve y Karen Strom y Gary Grasdalen, del Observatorio Nacional de Kitt Peak, reconocieran un aspecto fundamental del problema: los objetos HH aparecen en la superficie de las nubes moleculares. Estas nubes tienen, además de sus componentes atómicos y moleculares (fundamentalmente H_2), partículas de polvo cósmico, constituido principalmente por silicatos y grafito. El polvo cósmico mide décimas de micrometro y las partículas que lo integran se ven a veces recubiertas por una capa de hielo; absorbe fácilmente la radiación electromagnética visible (con longitud de onda entre 3000 y 7000 angstrom), y, por tanto, cualquier fuente de radiación en estas longitudes de onda que se encuentre dentro de una nube molecular será invisible desde fuera. Afortunadamente, el polvo cósmico absorbe menos la radiación electromagnética con mayor longitud de onda (la absorción viene a ser inversamente proporcional a la longitud de onda); así pues, la radiación infrarroja (longitud de onda entre 7000 angstrom y 1 milímetro) escapa fácilmente del interior de las nubes moleculares.

Strom y sus colegas conjeturaron que, si fueran estrellas la fuente de energía de los objetos HH, podrían encontrarse en el interior de la nube donde no serían detectables en el rango visible del espectro. Pero la radiación infrarroja de estas hipotéticas estrellas sí escaparía al exterior de la nube y revelaría su existencia al observador. Strom y sus colegas buscaron minuciosamente en la posición de diversos objetos HH y sus vecindades. Aunque no hallaron estrellas infrarrojas en la posición misma de los objetos HH, sí las había en las cercanías del objeto. Estas estrellas podrían constituir la fuente de energía buscada, siempre y cuando algún mecanismo la transportara de la estrella a un punto que distase décimas de parsec (10^{18} centímetros), donde aparecería el objeto HH.

Por esas mismas fechas, el mismo grupo de trabajo informó también de un rasgo interesante de ciertos HH. La radiación emitida por algunos (HH24,

sobre todo) estaba fuertemente polarizada. Es decir, el vector eléctrico asociado a la radiación emitida por el objeto estaba alineado preferentemente en una dirección. Más aún, las perpendiculares a la dirección de polarización apuntaban hacia la estrella infrarroja asociada. Estas características recibían una justificación natural en la hipótesis de que los objetos HH fueran nebulosas de reflexión, que se limitaran a reflejar la radiación emitida por la estrella. Y así, esos astrofísicos propusieron un modelo, llamado de los túneles, en el cual los objetos HH serían en efecto simples nebulosas de reflexión. El modelo hablaba de una estrella, probablemente de tipo T Tauri (similar a las observadas en las mismas nubes moleculares), rodeada de una "envolvente" con espectro igual al contemplado en los objetos HH. La estrella permanecería oculta en el visible por encontrarse sumergida en una nube molecular y aparecería sólo como estrella infrarroja. Sin embargo, la radiación emitida por la estrella y su envolvente se reflejaría en partes de la nube.

HH1

Estrella CS

HH2



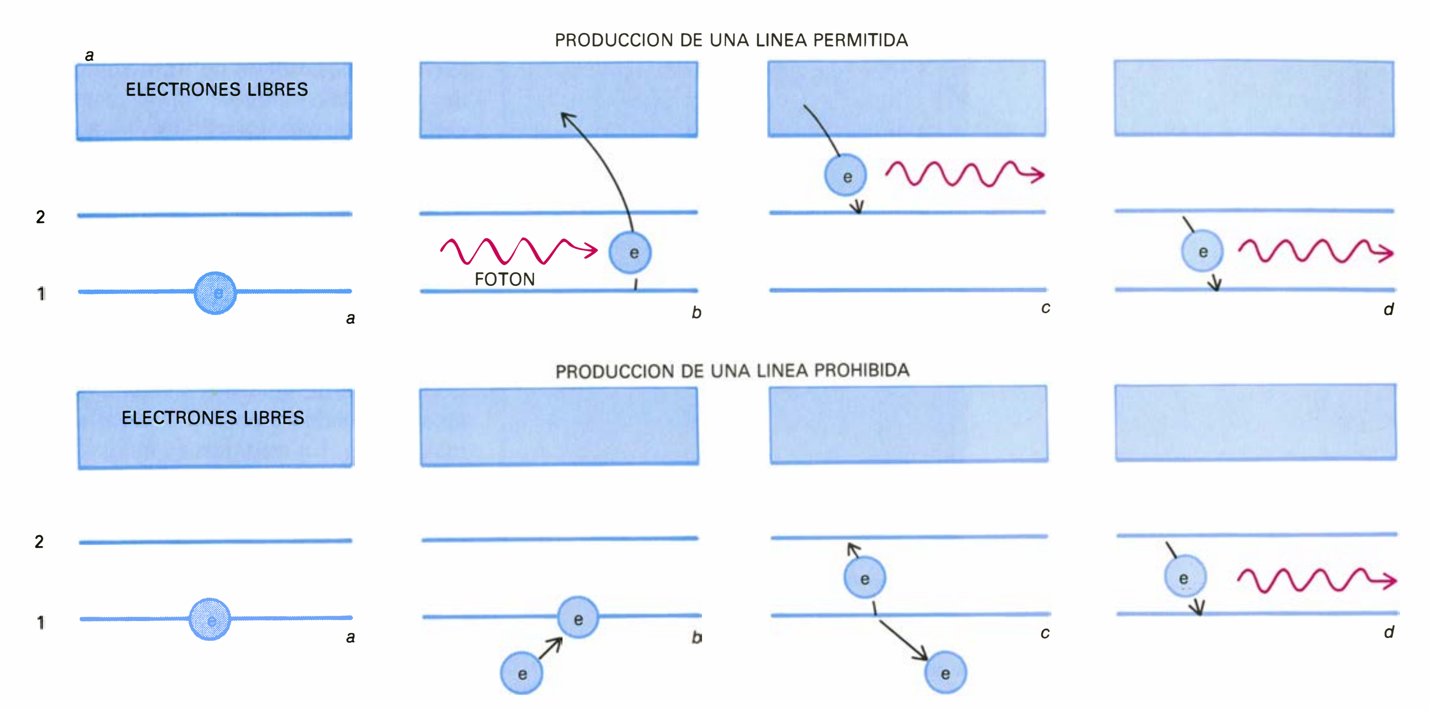
5. OBJETOS HERBIG-HARO 1 y 2, en una fotografía reciente. Se aprecia claramente su estructura, que consiste en varias subcondensaciones conectadas entre sí por una nebulosidad difusa y muy débil. Cada subcondensación identificada dentro de un mismo objeto se denota por una letra. El diagrama inferior identifica las subcondensaciones que constituyen HH2. (Ilustraciones tomadas de Herbig, G. H. y Jones B. F., *The Astronomical Journal*, vol. 86, pp. 1232-1244, con cuyo permiso se publican.)

El modelo de los túneles hubo de hacer frente a varias dificultades que cuestionaban su valor para explicar la naturaleza de los objetos HH. En primer lugar, la geometría propuesta rozaba lo arbitrario. En segundo lugar, se exigía que el espectro de cada subcondensación dentro de un mismo objeto HH fuera único, ya que reflejaría la luz de una misma estrella. Pero los espectros registrados variaban. En tercer lugar, el cono de luz interceptado por los objetos HH respecto a la estrella responsable era angosto; haría falta una estrella de luminosidad mucho mayor que la inferida de las observaciones infrarrojas para explicar la luminosidad de los objetos HH. Por supuesto, esta objeción desaparecería si la estrella dispusiera de algún mecanismo para enfocar su luz hacia los objetos HH. Pero el último y más duro argumento contra la hipótesis de la nebulosa de reflexión lo aportaban los experimentos realizados por Joseph Miller y Gary Schmidt, del Observatorio de Lick.

Lo dijimos antes, el espectro visible de los objetos HH consta de fuertes líneas de emisión superpuestas a un débil continuo. En el marco hipotético de la nebulosa de reflexión, líneas y espectro continuo son producidos por la estrella o por la envolvente que la rodea (o por ambos); por consiguiente, una y otro salen reflejados hacia el observador. Al ser reflejada, la radiación tendría que polarizarse intensamente a lo largo del proceso. Las mediciones de Miller y Schmidt demostraron, no obstante, que, si bien el débil continuo del espectro visible se polarizaba parcialmente, las fuertes líneas características de los objetos HH no presentaban polarización alguna. Difícilmente podrían ser, pues, el resultado de una reflexión. De otra manera: habrían de ser producidas, *in situ*, en los objetos HH.

Pero las investigaciones infrarrojas de Strom y colaboradores habían revelado algo muy importante: existían estrellas en las proximidades de los objetos HH, que, quizá, constituyesen su fuente de energía, aun cuando se desconociese el mecanismo por el cual las estrellas transportaban su energía a los objetos HH.

El polvo cósmico, menos opaco a la radiación infrarroja, se muestra casi transparente a la radiación de radio (radiación electromagnética con longitud de onda mayor que el milímetro). La radioastronomía es, pues, el medio idóneo para abordar el examen del interior de las nubes moleculares. Basados en este razonamiento, los radioastrónomos Aubrey Haschick y James



6. LINEAS PERMITIDAS Y PROHIBIDAS. Se deben las primeras (*fila superior de diagramas*) a la desexcitación de un nivel no metaestable; las segundas, las líneas prohibidas (*fila inferior de diagramas*), se deben a la desexcitación de niveles metaestables. Vayamos con la producción de una línea permitida. Se consideran dos niveles energéticos no metaestables, 1 y 2, de un átomo y el continuo de niveles energéticos de los electrones libres. Un electrón del átomo se encuentra en el nivel energético 1 (*a*). Al absorber el átomo un fotón ultravioleta, queda ionizado (*b*). Un electrón se recombina al nivel 2, emitiendo un fotón de continuo (*c*). Por fin, el átomo se desexcita del nivel 2 al 1 y emite un fotón en una línea permitida. ¿Qué ocurre con la producción de una línea prohibida? Se consideran dos niveles energéticos metaestables, 1 y 2, de un átomo. Un electrón del átomo se encuentra en el nivel energético 1 (*a, del diagrama inferior*). Un electrón libre choca con el átomo, cediéndole parte de su energía (*b*). El electrón en el átomo pasa al nivel energético 2, gracias a la energía cedida por el electrón libre (*c*). Por último, el electrón se desexcita del nivel 2 al nivel energético 1 y emite un fotón en una línea prohibida (*d*).

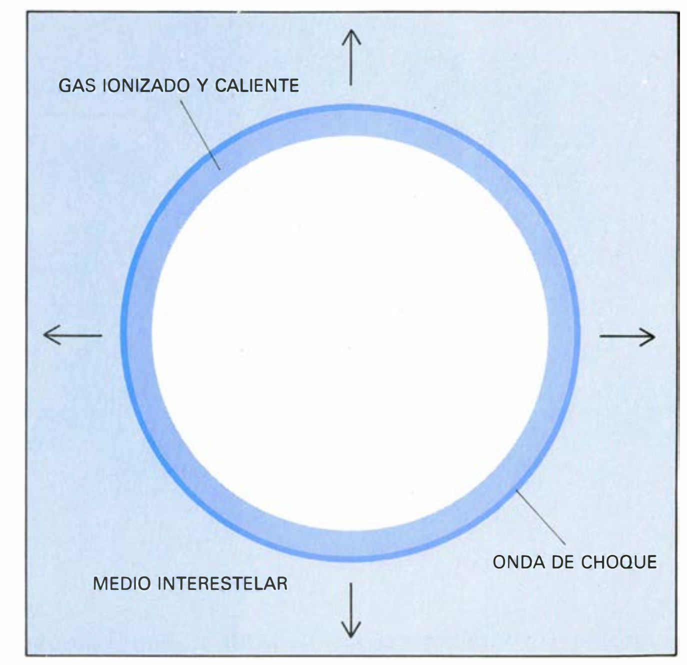
Moran, de la Universidad de Harvard, y uno de los autores (Rodríguez) iniciaron programas de búsqueda de fuentes de radio en la cercanía de objetos Herbig-Haro que revelaran la existencia de estrellas invisibles ópticamente. En particular, el vapor de agua, que forma parte del material gaseoso que rodea la estrella recién nacida, emite radiación máser muy intensa. Los resultados radioastronómicos confirmaron y generalizaron lo que se había hallado en el infrarrojo: por las proximidades de los objetos HH solían merodear estrellas recién formadas. La siguiente pregunta surgió de inmediato: ¿Cómo se relacionaban éstas con aquéllos? Parecía lógico esperar que estas estrellas proporcionaran energía a los objetos HH. Sin embargo, aun cuando las estrellas estaban próximas a los

NEBULOSA FOTOIONIZADA

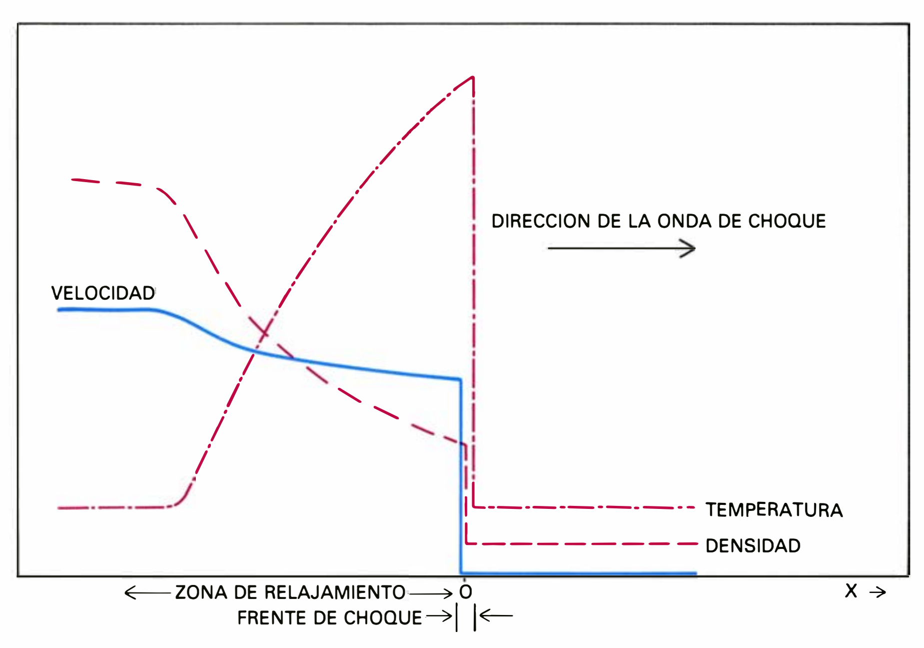
GAS IONIZADO Y CALIENTE

ESTRELLA IONIZADORA

MEDIO INTERESTELAR



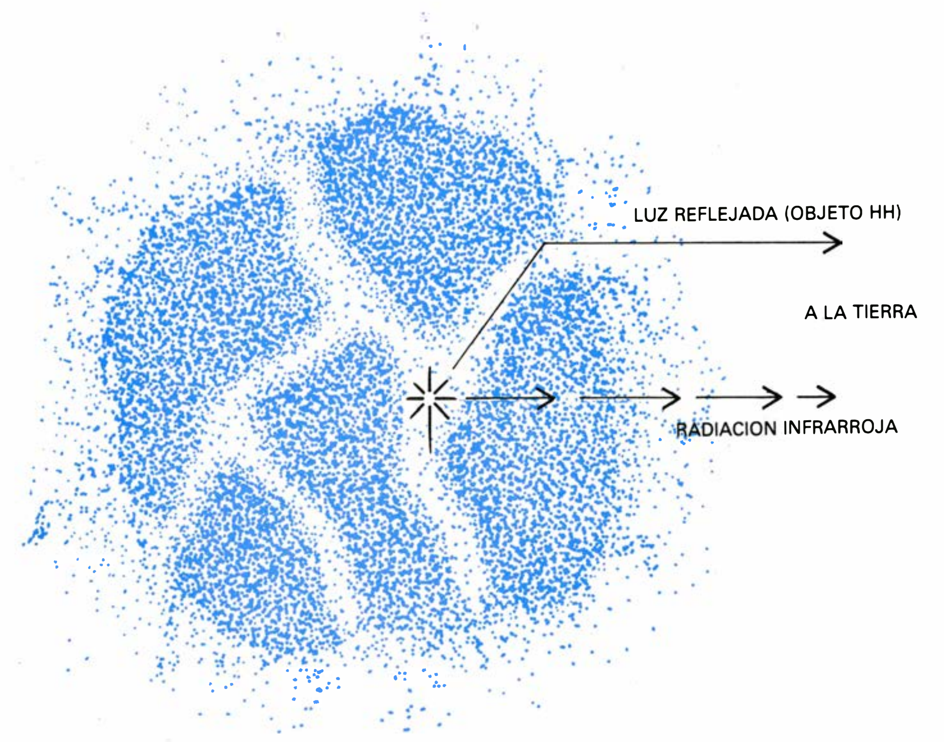
7. EN DOS GRANDES CATEGORIAS se agrupan las nebulosas brillantes comunes: nebulosas fotoionizadas y remanentes de supernova (el gas eyectado durante la explosión de una supernova). En la nebulosa fotoionizada, una estrella central a muy altas temperaturas (superiores a los 30.000 grados K) fotoioniza y calienta el gas circundante. En la remanente de supernova (*derecha*) la cáscara eyectada durante la explosión de supernova actúa como un pistón supersónico esférico sobre el gas circundante. El gas que ha sufrido la embestida se acumula en el cascarón y se enfría emitiendo líneas espectrales.



8. ESTRUCTURA de una onda de choque. Esta se puede dividir, a grandes rasgos, en dos regiones. El frente de choque abarca unos cuantos caminos libres medios del gas; en su interior, el gas es acelerado, comprimido y calentado a muy altas temperaturas. La zona de relajamiento, mucho más ancha que el frente de choque, es donde el gas se enfría, se comprime fuertemente y se acelera un poco más. Si el material no perturbado aún por la onda de choque (*a la derecha*) es neutro, al pasar sobre él la onda de choque y ser calentado a temperaturas muy altas, se ionizará por colisiones entre los propios átomos. La radiación emitida por el gas en el proceso de enfriamiento muestra un espectro muy característico, cuyos detalles dependen de la composición química del gas, su densidad y la velocidad de avance del frente.

objetos HH no parecían guardar una asociación directa con ellos, sino que entre ambos mediaban distancias considerables (varias décimas de parsec). No se sabía a ciencia cierta qué mecanismo ponía a la estrella en comunicación con el objeto HH.

A mediados de los setenta, Richard Schwartz, de la Universidad de Missouri, y uno de los autores (Cantó) sugirieron que el vehículo que usaban las estrellas para enviar energía a los objetos HH quizá no fueran fotones, sino partículas.



9. MODELO DE "TUNELES" para los objetos HH. Una estrella joven, probablemente de tipo T Tauri, está rodeada por una envolvente con espectro igual al observado en los objetos HH. La estrella se hace visible sólo en el infrarrojo, ya que se halla sumergida en la nube molecular. La radiación emitida por la estrella y la envolvente logra escapar a través de túneles de menor densidad de la nube, hasta que termina por ser reflejada hacia el observador creando el objeto HH. Trabajos posteriores demostraron que este modelo, defendido por Steve y Karen Strom, no satisfacía las características de los objetos Herbig-Haro.

Además de la luz, muchas estrellas (Sol incluido) emiten un flujo continuo de partículas llamado viento estelar, que parte de sus superficies y es acelerado a velocidades supersónicas de cientos o miles de kilómetros por segundo. En el caso del Sol, por ejemplo, este flujo de material, llamado viento solar, alcanza una velocidad de unos 300 kilómetros por segundo (más de diez veces la velocidad del sonido en el viento) a la altura de la órbita de la Tierra; el flujo de material involucrado es de aproximadamente 10^{-14} masas solares por año. En este tipo de modelos se proponía que el viento estelar, después de viajar distancias considerables, chocaría con grumos (es decir, condensaciones de alta densidad) de la nube molecular. Similarmente a lo que sucede en una remanente de supernova, la energía cinética del viento estelar serviría para calentar el viento estelar y el material de la nube molecular a muy altas temperaturas ($10^6 - 10^7$ grados K) mediante una onda de choque. La radiación emitida por este gas al enfriarse produciría la emisión característica de los objetos HH.

La idea de que choques entre vientos estelares y condensaciones de la nube molecular producían los objetos HH recibió considerable apoyo cuando los modelos teóricos del espectro emitido por un gas calentado por una onda de choque, desarrollados por John Raymond, de la Universidad de Harvard, y Michael Dopita, del Observatorio de Monte Stromlo en Australia, lograron explicar varias de las peculiaridades de los espectros observados en los objetos HH. La diferencia principal entre las ondas de choque propuestas para los objetos HH y las que se sabía existen para las remanentes de supernova estriba en que la velocidad de las primeras (de 50 a 1000 kilómetros por segundo) era menor que la velocidad de las segundas (de 100 a 1000 kilómetros por segundo). Esta concordancia entusiasmó a la comunidad científica, pero no tardaron en aparecer nuevas dificultades. La luminosidad de los objetos HH era similar en magnitud a la potencia de los vientos estelares. Esto no encajaba en el marco de un viento isotrópico, puesto que la energía quedaría distribuida en una esfera alrededor de la estrella y no en una pequeña región (el objeto HH). Era como si la estrella enfocara su viento en una dirección preferente.

Los autores, en colaboración con José Barral, Patricia Carral y José M.ª Torreles, del Instituto de Astronomía de la UNAM, comenzaron, hacia

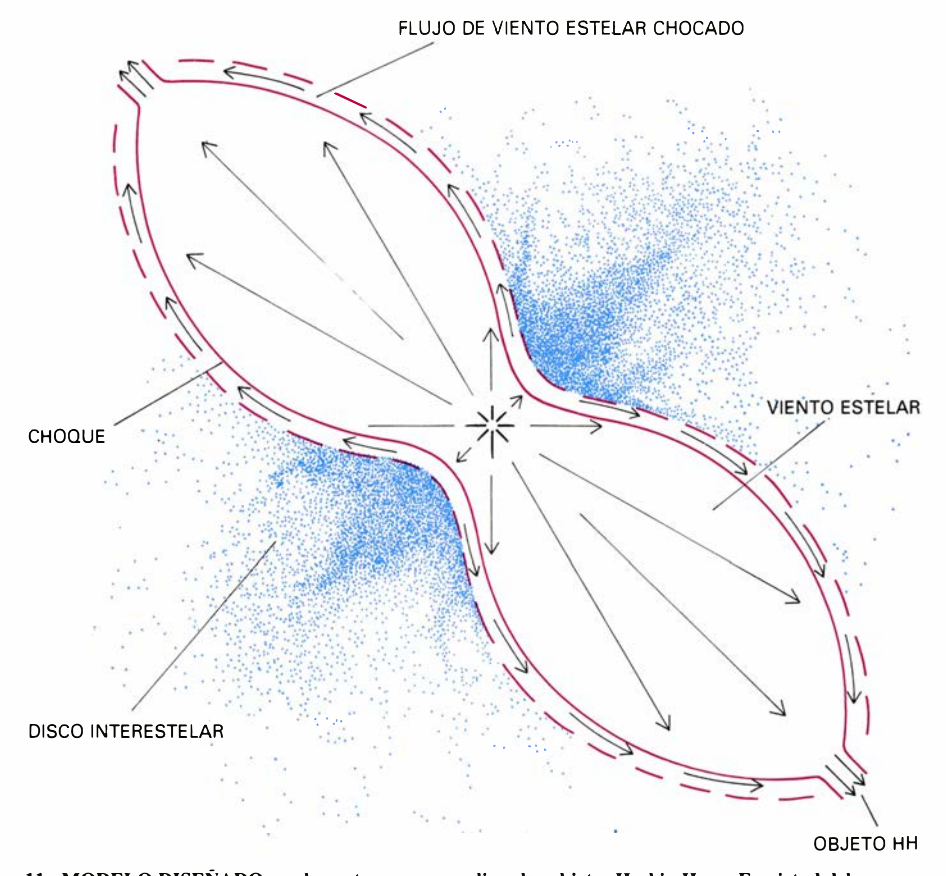
1979, a explorar teórica y observacionalmente mecanismos que permitieran a la estrella "enfocar" su viento en un punto lejano. Las estrellas se forman de fragmentos de nube molecular que se contraen gravitacionalmente. Por razones de conservación de momento angular y momento magnético, se puede argumentar que la estrella recién formada estará rodeada de un disco gaseoso de dimensiones de décimas de parsec remanente del material que sirvió para constituir la estrella misma. El viento de la estrella, originalmente isotrópico, lo frenaría el disco en su plano, pero escaparía libremente en los polos y configuraría una estructura con forma de toro. El viento estelar chocaría de manera oblicua contra las paredes de la cavidad. En ese choque oblicuo, sólo se termalizaría la componente perpendicular del vector velocidad. La componente paralela no se vería afectada y el viento estelar se refractaría, conservando una fracción apreciable de su momento y energía. El toro alrededor de la joven estrella produciría dos flujos anulares antiparalelos, donde se colimaría una buena parte de la energía mecánica del viento. A diferencia de un flujo isotrópico que se diluye geométricamente con la distancia al objeto emisor, un flujo colimado puede viajar largas distancias sin diluirse. El modelo requería, por tanto, la presencia de una nube molecular en forma de disco o toro, alrededor de la estrella excitadora, que proporcionara el ambiente adecuado para el enfoque del viento estelar.

Con el objeto de poner a prueba experimental este modelo decidimos hacer radiobservaciones de una región de Monoceros. Ahí se hallaban tres objetos que podrían ser los elementos necesarios para explicar el problema de la fuente remota de energía. En primer lugar, teníamos al objeto HH39, formado por varias subcondensaciones. Al sur de él, se encontraba una estrella joven, R Monocerotis, colocada en la punta de una nebulosidad de forma cometaria, NGC 2261. Inferimos que, aun cuando se encontraba a 1,7 parsecs de HH39, la estrella R Monocerotis era su fuente de energía. Las observaciones de radio se realizaron con el radiotelescopio de 11 metros de Kitt Peak. Estudiamos una transición rotacional del monóxido de carbono que es intensa y fácil de cartografiar. Las observaciones revelaron que alrededor de la estrella, como esperábamos, había una nube gaseosa en forma de dona, que estaba canalizando al viento estelar en dos chorros antiparalelos. Aparentemente, el chorro norte chocaba con otra nube de la zona y en este choque se producía HH39 [*véase la figura 12*]. En esta región las circunstancias fortuitas permiten observar, en el visible, la estrella responsable.

En otras regiones del cielo la situación se torna mucho más compleja y existe más gas y polvo que impiden detectar en el visible la estrella. Sin embargo, la acción del viento estelar, enfocado en dos flujos antiparalelos por la nube en forma de dona alrededor de la estrella debería estar afectando (empujando) al gas y polvo circundante. Tal es el caso de la nube molecular L1551, donde Ronald Snell, de la Universidad de Massachusetts, y sus colaboradores descubrieron un caso espec-

Atomo o Ion	λ (Angstrom)	Modelo	HH43	HH47
[OII]	3727 + 3729	.269	.118	.87
[SII]	4068 + 4076	66.9	70.5	.81
HI	4100	18.8	17.6	20.4
HI	4340	39.0	40.7	43.7
HI	4861	.100	.100	.100
[OIII]	5007	<20.1	1.7	<0.5
[NI]	5199	.171	.114	.127
[OI]	6300	.535	.373	.320
[OI]	6363	.166	.120	.101
[NII]	6548	11.2	.29	.26
HI	6563	.432	.457	.463
[NII]	6584	33.0	95.	.67
[SII]	6717	.406	.363	.448
[SII]	6731	.366	.352	.471
[OII]	7318 + 7330	6.8	4.0	<.10

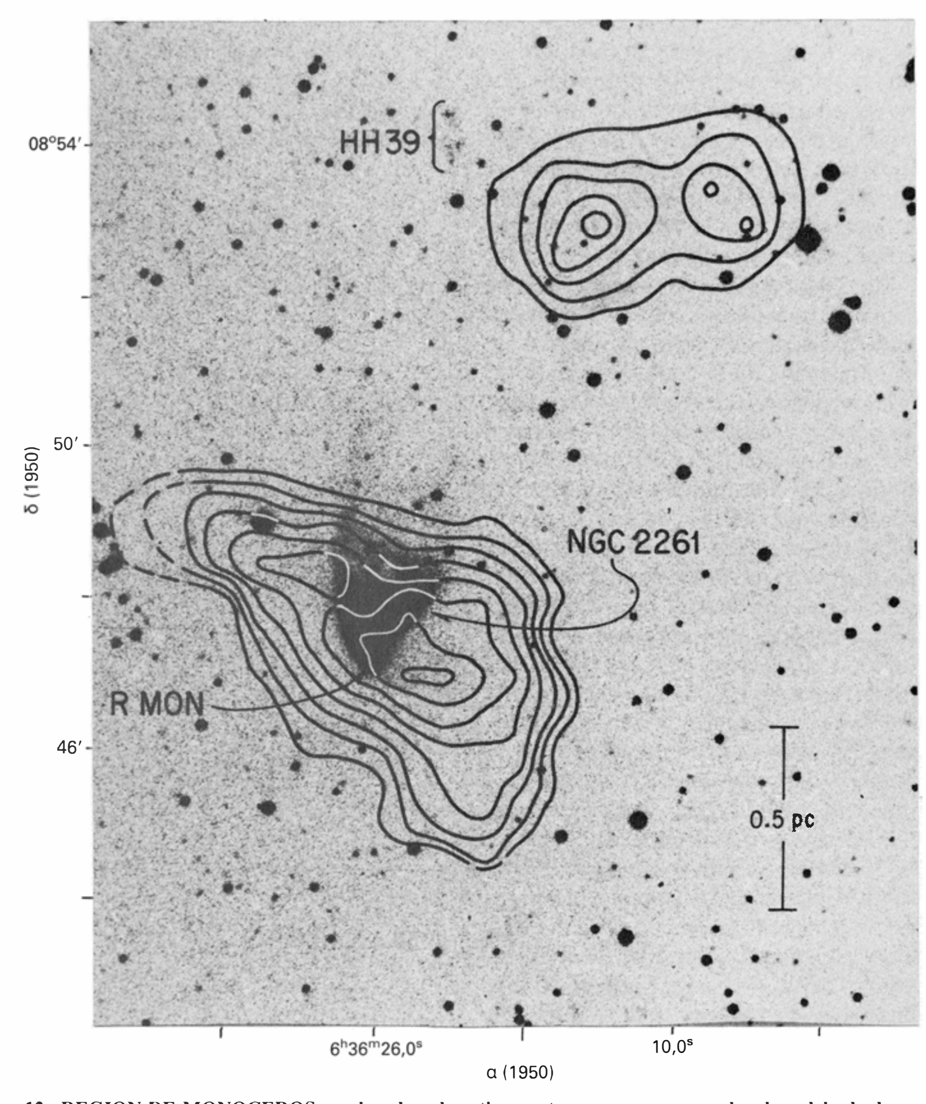
10. COMPARACION DEL ESPECTRO observado en HH43 y 47 con el espectro teórico calculado por Dopita, Binette y Schwartz. En la primera columna se registra el átomo o ion emisor junto con su estado de ionización. Los corchetes indican que se trata de una línea prohibida. La segunda columna da la longitud de onda (λ) de la línea. Las siguientes muestran la intensidad en la línea tanto calculada como observada. Las intensidades se han normalizado a la línea con λ de 4861 Å del átomo de hidrógeno.



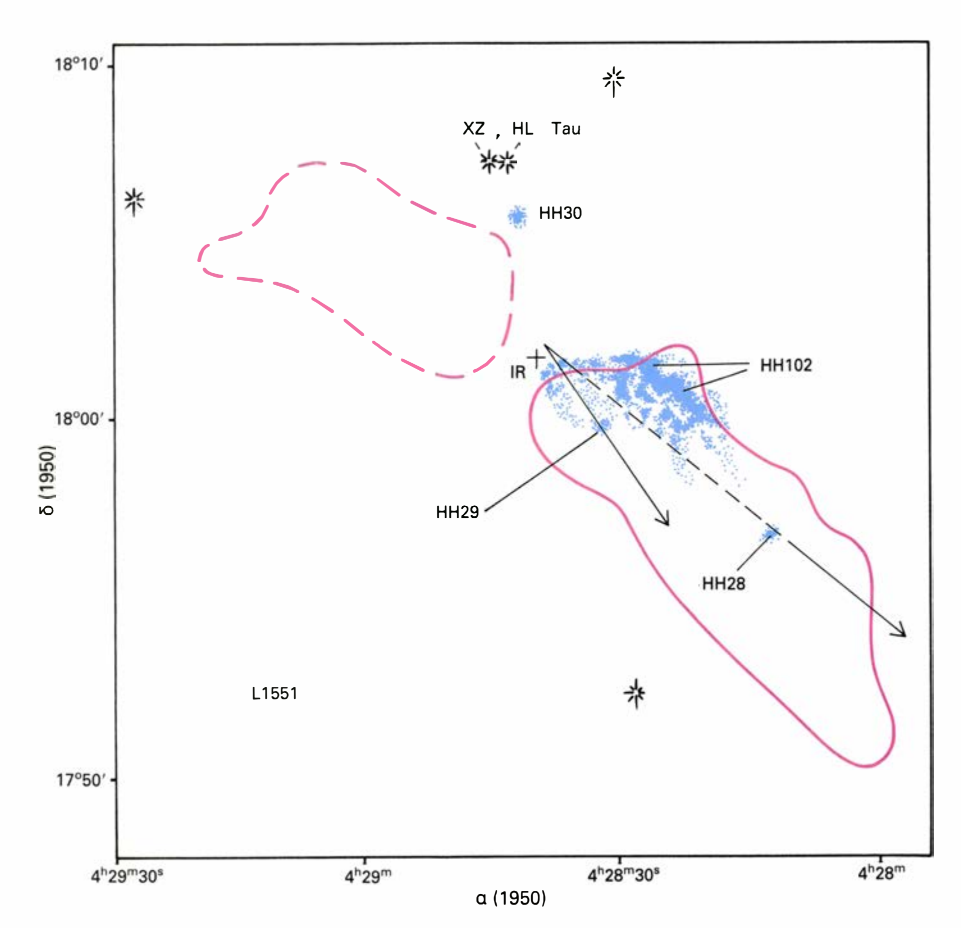
11. MODELO DISEÑADO por los autores para explicar los objetos Herbig-Haro. En virtud del proceso de formación de estrellas, parte del material de la nube original termina, cabe presumirlo, alrededor de la estrella y da origen a un disco gaseoso con dimensiones del orden de décimas de parsec. El viento de la estrella, isotrópico en un comienzo, lo detendrá el disco en su plano, pero escapará libremente por los polos formándose una estructura en forma de toro. El viento estelar chocará oblicuamente con las paredes de la cavidad, refractándose y formando dos flujos anulares antiparalelos. Estos flujos, al alejarse de la estrella, disminuirán su sección hasta converger en un punto. Ahí se producirá un segundo choque donde el viento estelar liberará una fracción apreciable de su energía, produciendo un objeto HH.

tacular de flujo de material molecular en forma bipolar [*véase la figura 13*]. En el centro del flujo hay un objeto infrarrojo que posiblemente lo energiza. El lóbulo inferior consta de gas que se acerca a nosotros y, el lóbulo superior, de gas que se aleja. Asociado con el lóbulo inferior se aprecian los objetos HH28 y HH29, que vuelven a constituirse por la interacción del viento estelar con la nube molecular. Simultáneamente al descubrimiento de Snell y colaboradores, Rodríguez, Morán y Paul Ho, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, descubrieron otro poderoso flujo bipolar en asociación con unas nebulosidades que Armen Gyulbudaghian y sus colaboradores clasificaron como objetos HH. A partir de entonces, se han identificado con técnicas de radio más de una docena de flujos bipolares, la mayoría asociados con objetos Herbig-Haro o nebulosidades similares. Se había dado con el mecanismo de transporte de energía de alto rendimiento.

Aun cuando el grupo de la UNAM se inclina por un toro de gas con dimensiones de décimas de parsec, otros grupos prestan su favor a mecanismos diferentes y existe una amplia disputa sobre el tema. Snell y sus colaboradores piensan en un disco alrededor de la estrella de dimensiones mucho menores, cientos de unidades astronómicas (1 unidad astronómica = $1{,}5 \times 10^{13}$ centímetros). Este disco, llamado circumestelar por estar en relación directa con la estrella, podría considerarse el precursor de un futuro sistema planetario alrededor de la estrella recién formada. Si esta conjetura resulta cierta, los flujos bipolares constituirían la primera prueba de sistemas protoplanetarios en otras estrellas. Finalmente, otros investigadores creen que las estrellas no necesi-



12. REGION DE MONOCEROS, explorada exhaustivamente para poner a prueba el modelo de dona. Se encuadran en ella HH39 y la nebulosa de reflexión de forma cometaria NGC 2261, en cuya punta se ubica la estrella R Monocerotis. Superimpuestos se muestran isocontornos de igual intensidad de la radiación del monóxido de carbono emitida por la nube molecular alrededor de R Mon, y de una pequeña nube molecular cerca del objeto Herbig-Haro. De acuerdo con el modelo de enfoque de viento estelar, el viento de R Mon es colimado en la dirección de Herbig-Haro número 39 por la nube en forma de dona. El flujo de viento estelar choca entonces con la otra nube en la zona y en esa colisión se produce HH39.



13. EN LA NUBE MOLECULAR L1551, Ronald Snell descubrió un caso espectacular de flujo bipolar de material molecular. La región contiene cuatro objetos Herbig-Haro, números 28, 29, 30 y 102. Este último difiere morfológicamente de los demás: en vez de presentarse como pequeñas condensaciones se muestra como una nebulosidad extendida. Existen en la misma región dos estrellas tipo T Tauri, XZ y HL Tau, así como una intensa fuente infrarroja, indicada por una cruz en el diagrama. El centro del flujo bipolar es el objeto infrarrojo. Material molecular alejándose de nosotros se localiza en la parte superior del diagrama, en la zona definida por la línea quebrada. La línea continua enmarca la región donde el material molecular avanza hacia el observador. Asociados con esta última región se encuentran los objetos Herbig-Haro números 28 y 29, que se forman por la interacción del viento estelar con la nube molecular. Las flechas sobre estos objetos señalan la dirección y magnitud de sus movimientos propios; las direcciones, al prolongarse hacia atrás, se intersectan cerca de la posición de la fuente infrarroja.

tan de nigún agente externo que confine su viento y lo haga, de isotrópico, bipolar; sugieren que el viento estelar es, desde su origen, bipolar: la estrella misma no eyecta material de forma isotrópica, sino, preferentemente, en dos chorros antiparalelos. Gran parte del trabajo futuro se irá en tratar de definir cuál es el mecanismo de enfoque bipolar.

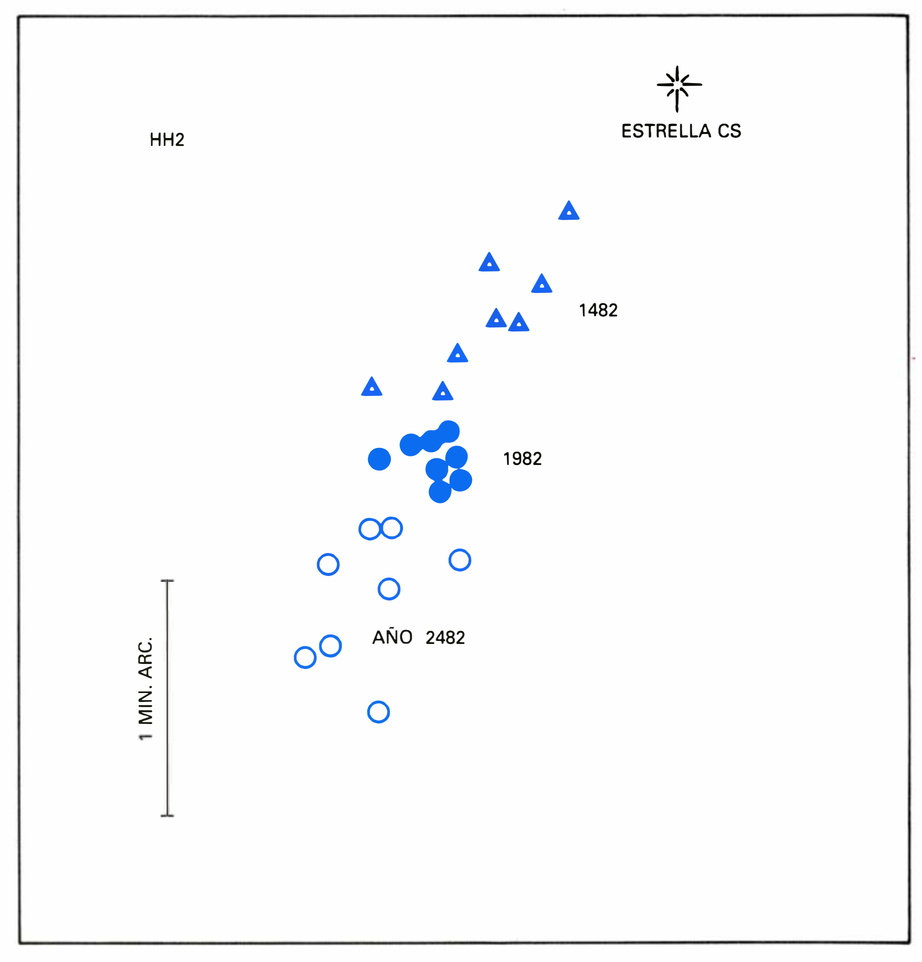
También muy recientemente, George Herbig y sus colaboradores descubrieron una nueva faceta de los objetos HH. Comparando placas fotográficas tomadas con décadas de diferencia, encontraron que los objetos HH números 1, 2, 28, 29 y 39 se van desplazando por el cielo a velocidades del orden de cientos de kilómetros por segundo. El desplazamiento es en el sentido de alejamiento de la estrella que se había identificado como su fuente de energía (R Monocerotis en el caso de HH39, un objeto infrarrojo para HH28 y 29, una estrella estudiada por Cohen y Schwartz para HH1 y 2). En la figura 14 mostramos la distribución espacial de las subcondensaciones de HH2 respecto a la estrella de Cohen y Schwartz (estrella CS).

El movimiento de los objetos HH en relación a su respectiva estrella excitadora sugiere que pudieran ser condensaciones gaseosas eyectadas por la estrella. Sin embargo, el siguiente argumento indica, por contra, que tales objetos deben formarse muy cerca del lugar donde los vemos actualmente y que no salieron de la estrella. Si proyectamos el movimiento de los componentes de HH2 500 años hacia el pasado y también hacia el futuro, encontramos que el objeto se dispersa de un modo considerable. Resultaría, pues, difícil aceptar que las condensaciones que forman HH2 y otros objetos fueron eyectadas por la estrella en distintas épocas y a distintas velocidades, de suerte que, por pura coincidencia, los observaríamos hoy agrupados, pero volverían a dispersarse en el futuro.

En el contexto del modelo de la dona interestelar propuesto por el grupo de

la UNAM los objetos HH se forman en el punto de confluencia de los flujos anulares o bien cuando éstos encuentran una zona densa. Predice este modelo que los objetos HH nunca se verán cerca de la estrella, sino que "aparecerán" en el mismo sitio, es decir, donde actualmente contemplamos los objetos alejándose de la estrella. Aun cuando esta predicción requerirá de observaciones de alta calidad, a lo largo de las décadas futuras, en HH2 se ha detectado la aparición repentina de una nueva condensación.

Después de muchos años de casi absoluto desconcierto, la combinación de diversas técnicas observacionales en el visible, infrarrojo y radio, y de notables avances teóricos, ha permitido a los astrónomos comprender al menos los fundamentos del fenómeno de los objetos HH. Se trata de nubecillas de gas caliente en proceso de enfriamiento, tras haber sido calentadas e ionizadas por el paso de una onda de choque. Su fuente última de energía es una estrella muy joven y relativamente lejana, cuyo viento estelar se está enfocando en dos chorros antiparalelos por un disco gaseoso de tamaño y características aún no bien establecidas. Las nubecillas de gas chocado se están alejando de la estrella a velocidades similares a las del mismo viento. Desde un punto de vista global, los objetos HH revelan la presencia cercana de una estrella en formación. Diríase que los objetos HH son como los signos externos de embarazo en la mujer, puesto que indican que en el interior de la nube en la que aparecen hay o hubo recientemente nacimiento de estrellas. La naturaleza básica de los objetos HH parece comprenderse ya bastante bien. En el proceso de investigación se ha descubierto el fenómeno de flujos bipolares que, según evidencia observacional reciente, parece ser muy común alrededor de estrellas jóvenes. De hecho, el interés de la comunidad astronómica comienza a moverse de los objetos HH a los flujos bipolares y a las estrellas que los producen. En la mejor tradición científica, la solución de ciertas incógnitas nos ha llevado al planteamiento de otras.



14. DISTRIBUCION ESPACIAL de las subcondensaciones de HH2 en relación a la estrella que Cohen y Schwartz estudiaron por si se trataba de la fuente de excitación de ese objeto. El movimiento propio de cada componente (según estimaciones de Herbig y colaboradores) se ha proyectado 500 años hacia el futuro y hacia el pasado; se ha llegado a la conclusión de que el objeto se dispersa considerablemente en ambos casos. De lo que se infiere que las subcondensaciones fueron calentadas y aceleradas *in situ*.



Así se parten los continentes

En un proceso que abarca millones de años se agrietan, separan y deforman. El estudio de la fracturación nos revela importantes propiedades de las placas que constituyen la corteza terrestre

Vincent Courtillot y Gregory E. Vink

La teoría de la tectónica de placas sostiene que la corteza terrestre se compone de placas de unos 100 kilómetros de espesor que se mueven unas con respecto a otras. Esta teoría permite justificar numerosos hechos y procesos. La distribución de terremotos y volcanes por todo el mundo se explica en gran parte en virtud del movimiento de las placas: su creación en las dorsales mesoceánicas; su destrucción por colisión o en zonas de subducción, donde se sumergen en el interior del manto terrestre; su fricción conforme se deslizan unas contra otras en las llamadas fallas transformantes. La similitud de forma entre los bordes de continentes que hoy distan miles de kilómetros (por ejemplo, el borde oriental de América del Sur y el borde occidental de Africa) demuestra que se agrietaron y separaron. En otras palabras, antes estuvieron unidos en una sola placa. La distribución de plantas y animales fósiles en los continentes aportan pruebas que lo corroboran.

Si se supone que las placas no se deforman a medida que se mueven, sus desplazamientos pueden calcularse por medio de teoremas matemáticos que describen el movimiento de un sólido sobre una esfera. En efecto, se ha reconstruido con considerable precisión el movimiento de la mayoría de las grandes placas de la Tierra a lo largo de más de 150 o 200 millones de años. Por otra parte, los movimientos de las placas, consideradas rígidas, sólo puede reconstruirse teniendo en cuenta su cinemática. Admitir que las placas son rígidas supone aceptar que sus límites tienen una geometría invariable, lo que impide proponer un modelo válido de cómo se divide la corteza continental. Se ha considerado así que la rotura que dio origen a América del Sur y Africa se produjo instantáneamente a lo largo de una línea, acontecimiento de lo más improbable.

En realidad, hay abundantes pruebas de que la corteza continental se deforma. Las cadenas de montañas, que a menudo resultan de la colisión de placas, constituyen la prueba más clara de tal deformación. Además, la distribución de los terremotos relacionados con límites de placa sugiere que dichos límites no son precisos; y la existencia de terremotos lejos de los límites de placa indica la relajación de tensiones y, por tanto, la producción de deformaciones en el interior de una placa. El trabajo que exponemos en este artículo lleva a pensar que la ruptura de la corteza continental puede entenderse como un proceso que se desarrolla durante millones de años a lo largo de una zona de varios centenares de kilómetros de anchura. Ello sugiere, además, que es inverosímil que la corteza de una zona así se comporte como algo rígido.

El dato fundamental en que se basa la teoría de la tectónica de placas se encuentra en el fondo oceánico: las anomalías magnéticas. A grandes rasgos, su origen es como sigue: el material volcánico que intruye en el eje de la dorsal mesoceánica está lo bastante caliente para que los pequeños dominios magnéticos que contiene se orienten según el campo magnético de la Tierra. Cuando el material se enfría, se expande, alejándose del eje de la dorsal y conservando la orientación adquirida. A continuación, a lo largo del eje hace intrusión nueva corteza. Mientras, el campo magnético de la Tierra cambia siguiendo un ritmo irregular, y su polaridad se invierte aproximadamente cinco veces cada millón de años. Por consiguiente, a medida que la nueva corteza oceánica se expande a partir del eje de la dorsal, dos "cintas" magnéticas registran la disposición de las inversiones. Ello ofrece la posibilidad de medir la edad del fondo oceánico y determinar a qué velocidad se han separado las placas. Los valores de velocidad obtenidos varían entre menos de un centímetro por año y más de 15 centímetros. Por otra parte, cuando el eje de la cresta está desplazado por una serie de fallas transformantes, la disposición de las bandas magnéticas de la corteza oceánica reproduce el desplazamiento.

Hay ejemplos, sin embargo, en los que el registro magnético no llega a reproducir el desplazamiento. Estas anomalías se atribuyeron en un principio a saltos repentinos de la cresta hacia nuevos emplazamientos. El problema estriba en que muchos de los saltos son demasiado frecuentes y están demasiado próximos en el tiempo. El proceso se entiende mejor si se acepta una evolución continua del límite de placa. Consideremos las peculiares disposiciones en *V* de las bandas de anomalías magnéticas que se encuentran en el Pacífico, una cerca de las islas Galápagos y otra en la dorsal de Juan de Fuca, junto a la costa pacífica de América del Norte. Un estudio de estas estructuras condujo a Richard N. Hey, a la sazón en el Instituto Geofísico de Hawai, y a sus colegas (en particular, Frederick K. Duennebier, de ese instituto hawaiano, W. Jason Morgan, de la Universidad de Princeton, y Peter R. Vogt, del Laboratorio de Investigación Naval de los Estados Unidos) a desarrollar un mo-

1. DEPRESION DE AFAR en el noreste de Africa, uno de los dos lugares de la tierra (el otro es Islandia) donde una dorsal centroceánica emerge de las aguas. El eje de tales dorsales es un valle de fractura (o rift), donde divergen dos grandes placas e intruye nueva corteza oceánica. La posición de los rifts en Afar es controvertida. Según los autores, un valle de fractura se dirige hacia el oeste, desde el golfo de Adén, al golfo de Tadjurah, el estrecho brazo de agua que se extiende desde la derecha de la imagen. Su extremo, actualmente en el lago Asal, se está propagando a través de la depresión y tiende a unirse con el valle de fractura cuya punta se mueve hacia el sur en el mar Rojo. (La boca del mar Rojo aparece arriba, a la derecha.) La expansión del valle de fractura provocará la aparición de una nueva cuenca oceánica. La imagen constituye un mosaico de seis instantáneas en falso color tomadas por satélites Landsat.

delo según el cual un valle de fractura, o rift, se propaga de manera continua a través de la corteza oceánica, a una velocidad pareja a la de la expansión de las placas del rift.

En opinión de Hey y Tanya M. Atwater, de la Universidad de California en Santa Bárbara, el proceso se desarrolla donde dos valles de fractura aparecen desplazados por una falla transformante. Si el proceso está modelado en escalones, cada escalón supone un salto súbito en el que el extremo del rift avanza, produciendo una nueva falla y desplazando corteza oceánica de un lado del rift hacia el otro (esto es, de una placa a otra) [*véase la figura 2*]. El resultado de ello es un rastro en forma de *V* constituido en parte por pequeñas piezas de corteza limitadas por fallas abandonadas. Si el proceso ha tenido lugar de forma continua, como ocurre de hecho en la corteza terrestre, aparece una discontinuidad en forma de *V* en el dibujo de las anomalías magnéticas. Hey puntualizó que esa disposición podía atribuirse erróneamente a una fractura. (La atribución es errónea porque en ningún caso se ha producido deslizamiento a lo largo de la discontinuidad.) Denominó pseudofallas a las ramas de la *V*.

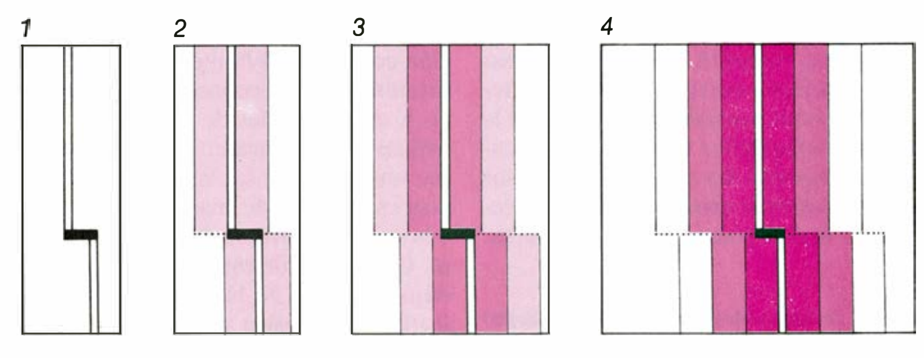
La fractura de la corteza continental puede implicar también la propagación de rifts, aunque hasta ahora se ha eludido siempre entrar en los detalles del proceso. A principios de la década de 1970, J. Tuzo Wilson, de la Universidad de Toronto, y Kevin C. Burke y John F. Dewey, de la Universidad estatal de Nueva York en Albany, postularon la existencia de posibles relaciones entre los "puntos calientes", las uniones triples y la rotura continental. Sugirieron que si un continente permanece fijo con relación al manto subyacente, las anomalías térmicas del manto (localizadas en los puntos calientes) producirían el abombamiento del continente y su ruptura en un valle de fractura de tres ramales. (Abombamiento y ruptura, que, con frecuencia, dan origen a configuraciones de tres ramales. Así ocurre, por ejemplo, en la corteza de un pastel que se cuece al horno.) Los tres rifts podrían entonces desarrollarse en dos rifts activos y un tercero abortado. (Burke y Dewey creyeron ver ejemplos de ese proceso en los márgenes escindidos del Atlántico.) Los rifts activos, al propagarse desde varias uniones, podrían, con el tiempo, juntarse y provocar la fragmentación del continente.

Recientemente se han propuesto otros dos mecanismos para ese proceso. En primer lugar, Morgan ha sugerido que la apertura del valle de fractura se produce a menudo a lo largo de una alineación de puntos calientes. Aquí, el desplazamiento de un continente sobre una anomalía térmica del manto subyacente origina una alineación de volcanes en la superficie. Bajo la superficie, la anomalía térmica adelgaza y debilita la corteza, haciéndola propensa a agrietarse. En segundo lugar, Hey y Vogt han postulado que un proceso parecido al del modelo de valle de fractura que se propaga a través de la corteza oceánica podría explicar en parte el agrietamiento de los continentes. En el fondo oceánico, sin embargo, el modelo requiere que un rift retroceda mientras avanza el otro; el modelo sólo justifica la modificación de la geometría de límites de placa preexistentes, por lo que no puede aplicarse a la ruptura de un continente, proceso en el que aparece un nuevo límite de placa.

De nuevo cobran aquí importancia las anomalías magnéticas. En 1977, uno de nosotros (Courtillot), trabajando con Louis Le Mouël y Armand Galdeano, de la Universidad de París, levantó un mapa magnético de una parte de la zona occidental del golfo de Adén y de parte de los terrenos emergidos adyacentes, la depresión de Afar de Djibuti y Etiopía. Afar es un laboratorio natural, donde se puede estudiar la expansión del fondo oceánico sin el inconveniente de tener miles de metros de agua por encima. Igual que Islandia, es una porción visible del sistema global de dorsales mesoceánicas. Se tiene la convicción de que en esta localidad emergida pueden recabarse abundantes datos acerca de los procesos fundamentales que se dan en la progresión del valle de fractura. Ya en 1938, el paleontólogo y filósofo francés Pierre Teilhard de Chardin pronosticó que Afar sería el sitio donde podría probarse la teoría de la deriva continental postulada por Alfred Wegener. Recientemente, los investigadores que se sumergieron en submarinos de exploración de la dorsal mesoatlántica situada a 37 grados de latitud Norte, dentro del programa franco-americano de inspección submarina mesoceánica (FAMOUS), quedaron impresionados por el parecido del rift de Afar con lo que habían visto bajo unos tres kilómetros de agua.

La información más fidedigna de lo que ocurrió en Afar procede de los mapas magnéticos [*véase la figura 3*]. Revelan éstos la yuxtaposición de dos tipos de corteza. En un tipo, las anomalías magnéticas son intensas y forman bandas paralelas. Se observa la disposición característica de la expansión del fondo oceánico. Las bandas pueden correlacionarse con los períodos comprendidos entre inversiones del campo magnético terrestre, lo que permite datarlas. En el otro tipo de corteza, las anomalías magnéticas son más anchas, redondeadas y menos intensas; definen una zona de calma magnética, o MQZ (del inglés *magnetic quiet zone*).

Las MQZ forman un inmensa *V* inclinada que interrumpe bruscamente la disposición oceánica. Interrumpe, por tanto, las bandas de anomalías magnéticas que marcan la expansión del fondo oceánico, lo que permite datar, con bastante precisión, los bordes de la MQZ. En el golfo de Adén, entre los 45 y 46 grados de longitud Este, los bordes tienen una edad de unos 10 millones de años, pues intersecan la anomalía magnética que representa el fondo oceánico de esa edad. Hacia el oeste, los bordes son progresivamente más jóvenes. Cerca del lago Asal, en Afar,



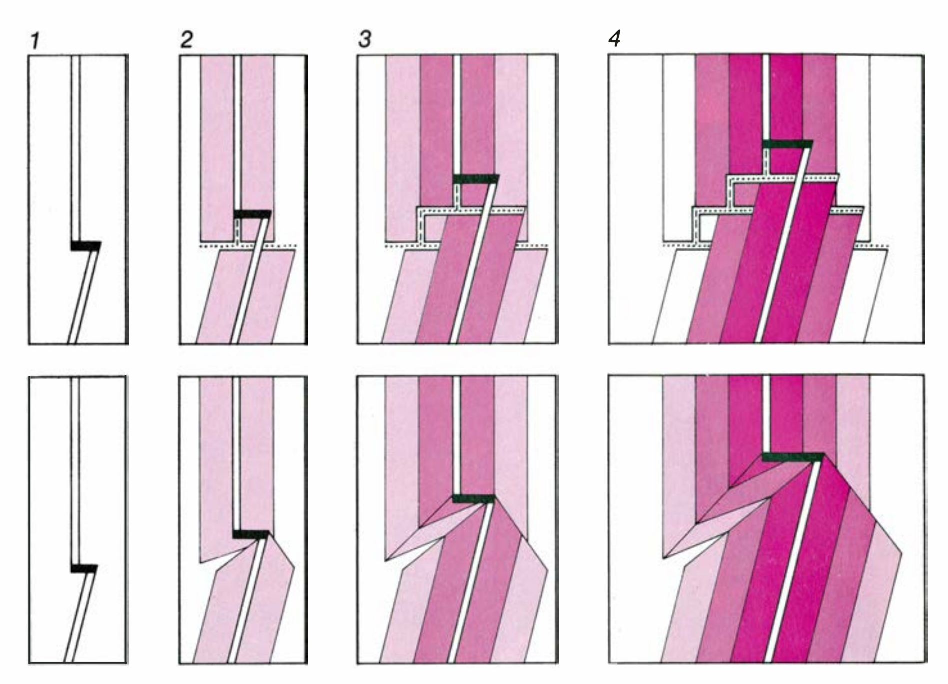
2. LAS ANOMALIAS MAGNETICAS son la prueba más clara de que se expande nueva corteza oceánica desde los valles de fractura mesoceánicos. Este valle (*1*) se muestra desplazado por una falla transformante (*negro*). Continuamente asciende nueva corteza procedente del manto. Al principio el magma está caliente, por lo que su magnetización intrínseca queda alineada con la que tenga la tierra en ese momento. Cuando se enfría y se solidifica, la magnetización queda fijada en aquella posición; de ese modo, por cada lado del valle diverge una banda de corteza magnetizada (*2*). El campo magnético terrestre de tiempo en tiempo invierte su polaridad. Cada inversión determina dos nuevas anomalías magnéticas (*3, 4*).

son ya muy jóvenes. Numerosos terremotos y el nacimiento de un volcán cerca del lago Asal, en noviembre de 1978, confirman que las cercanías del lago constituyen hoy un lugar de actividad tectónica.

La interpretación más sencilla de estas observaciones es que se está propagando un valle de fractura hacia el oeste, sobre una corteza oceánica y continental preexistentes. Los bordes de la MQZ se crearon por una propagación anterior, que formó corteza oceánica nueva a su paso. Se abrió así el golfo de Adén. El ángulo de la *V* que delimitan los bordes es de unos 30 grados. Por simple trigonometría, se deduce la velocidad de expansión del fondo oceánico que ha abierto el golfo de Adén (1,5 centímetros por año) y la velocidad a la que el vértice del valle de fractura avanza hacia el oeste (tres centímetros por año).

Viene a apoyar esta interpretación el estudio de la actividad sísmica de la región emprendido por Jean-Claude Ruegg y Jean-Claude Lépine, de la Universidad de París. Estos autores observan que los focos de la mayoría de los terremotos del golfo de Adén se agrupan en una banda de aproximadamente 10 kilómetros de anchura, concentrada a lo largo del valle de fractura. (La posición del rift se deduce de la cartografía de la profundidad del golfo y de la posición de la anomalía magnética más reciente.) La banda de los focos de terremotos se extiende desde el golfo de Adén y se adentra en el golfo de Tadjurah, un estrecho brazo de mar que prolonga el golfo de Adén hacia el oeste. La banda coincide luego con el valle de fractura de Ghoubbet-Asal, que se extiende desde el golfo de Tadjurah hasta el lago Asal. Por lo que se ve, termina cerca del lago Asal, donde, según proponemos, se sitúa actualmente el extremo del valle de fractura en propagación. Al oeste del lago Asal, la sismicidad se muestra difusa, lo que da a entender que allí la corteza se está deformando en un área extensa.

Otras pruebas se recaban de la edad y composición química de los basaltos de Afar, que fueron determinadas por Michel Treuil, de la Universidad de París, Jacques Varet, del Bureau de Recherches Géologiques et Minières, y Oliver Richard, de la Universidad de París en Orsay. Los basaltos que se encuentran en los bordes del golfo de Tadjurah tienen composición toleítica: pobres en el mineral olivino, contienen ortopiroxeno. Esos basaltos se forman por una fusión parcial del manto, a gran escala, bajo una dorsal mesoceánica. Más cerca del lago Asal, en el extremo del valle de fractura, los basaltos son más alcalinos, esto es, más ricos en sodio y potasio. Ello indica un grado de fusión parcial menor que el experimentado por las toleítas. En cada localidad, la edad de los basaltos es muy similar a la edad deducida a partir de las anomalías magnéticas medidas en la corteza oceánica en ese punto.



3. MODELOS DE INTERRUPCIONES de las anomalías magnéticas que permiten poner en evidencia la propagación de los valles de fractura. En la serie de arriba se representa un modelo en sucesivos estadios, según Richard N. Hey, de la Universidad de California, y sus colegas. Dos valles de fractura en ángulo quedan desplazados por una falla transformante (*1*). Nueva corteza oceánica hace intrusión y se expande; el extremo del rift del sur se propaga hacia el norte, trasladando un bloque de nueva corteza continental del este al oeste del valle, es decir, de una placa a otra (*2*). Los sucesivos episodios de expansión del fondo oceánico y de propagación del rift (*3, 4*) producen en la discontinuidad magnética una zona en forma de *V*. Abajo se representa el proceso continuo; el fondo oceánico se expande a medida que se propaga el rift.

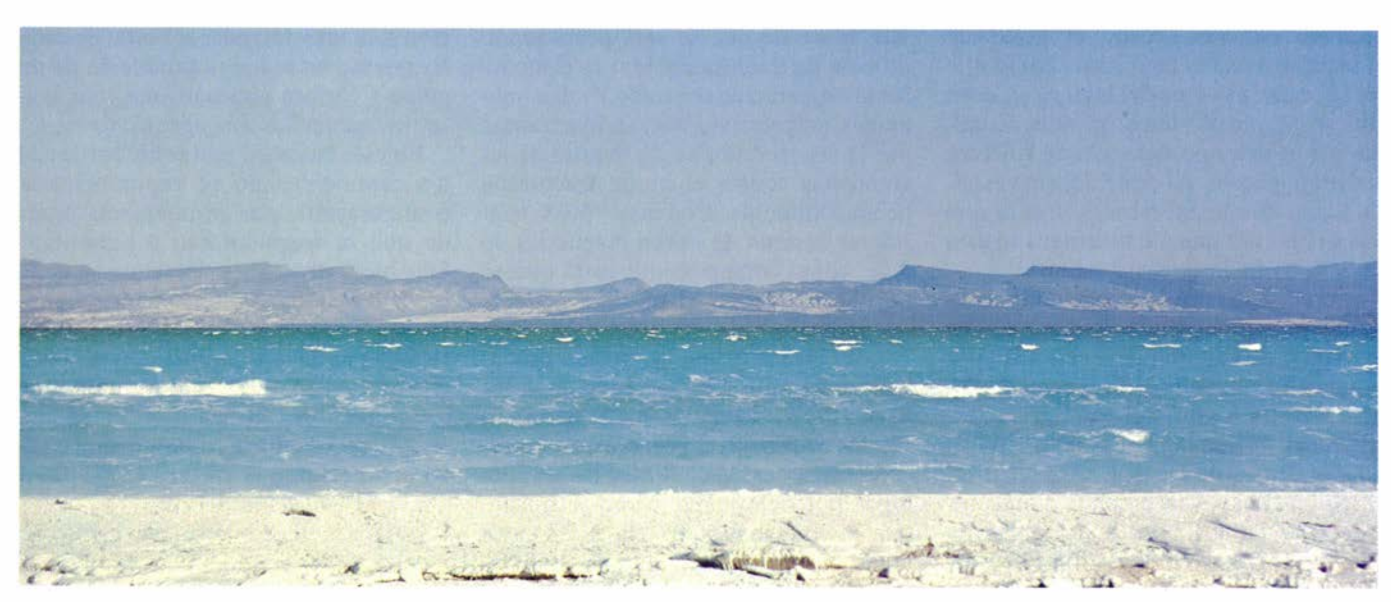
En resumen, el indicio más importante de que se está propagando un valle de fractura en Afar es el inconfundible carácter oceánico de las anomalías magnéticas, que se interrumpe por la intersección de las bandas de las anomalías contra el borde fracturado de un continente. Conviene, pues, considerar la zona de calma magnética de Afar como corteza continental que se ha deformado en el transcurso de la propagación.

Los indicios de que ha habido propagación de valles de fractura en otras partes del mundo, y de que se deformaron los continentes, proceden de las reconstrucciones: los intentos de los geólogos por determinar cómo se ajustaban los fragmentos de los continentes antes de que se fracturaran y separaran. El método usual consiste en encajar sus bordes. Para ello, cada fragmento se gira alrededor de un eje que pasa por el centro de la Tierra, haciendo coincidir las anomalías magnéticas de la misma edad. Si el borde de cada fragmento apareció en un único instante en el transcurso del tiempo, de suerte que el borde sea rigurosamente paralelo a la más antigua de las anomalías magnéticas del fondo oceánico, la reconstrucción tendrá éxito: los fragmentos encajarán exactamente, y al mismo tiempo obtendremos la edad de la apertura del valle de fractura. Sin embargo, si el rift se ha propagado, la reconstrucción será muy forzada: el borde de cada fragmento no se habrá producido de un golpe y cortará oblicuamente, por tanto, las anomalías magnéticas.

En esos casos, al juntar los bordes de los continentes no se reproducirá la configuración que presentaban antes de que se fragmentaran y separaran. Una reconstrucción más rigurosa puede hacer coincidir los puntos donde empezó la fracturación. Los continentes se superpondrán en algunos sitios, pero ello no supone ninguna desventaja. Los solapamientos representan el estiramiento de la corteza continental que tuvo lugar cuando la corteza se desgarró por la propagación del rift.

Así parece que ocurrió en el golfo de Adén. Si se intenta reconstruir, por ejemplo, las posiciones relativas de las placas africana y arábiga de hace 10 millones de años (edad de la llamada anomalía magnética 5), el golfo quedará

4. MAPA DE ANOMALIAS MAGNETICAS de Afar y del fondo del golfo de Adén. Pone de manifiesto la existencia de distintos tipos de corteza, yuxtapuestos. En el golfo, las anomalías (representadas por alternancias de azul y rojo) son intensas y alargadas, según la disposición típica de la corteza oceánica. En otras partes, hacia el nordeste sobre todo, las anomalías son suaves. Definen una región en forma de embudo (*gris*) llamada zona de calma magnética, o MQZ (*magnetic quiet zone*). La MQZ puede representar corteza continental deformada por la propagación del rift a lo largo del fondo del golfo.

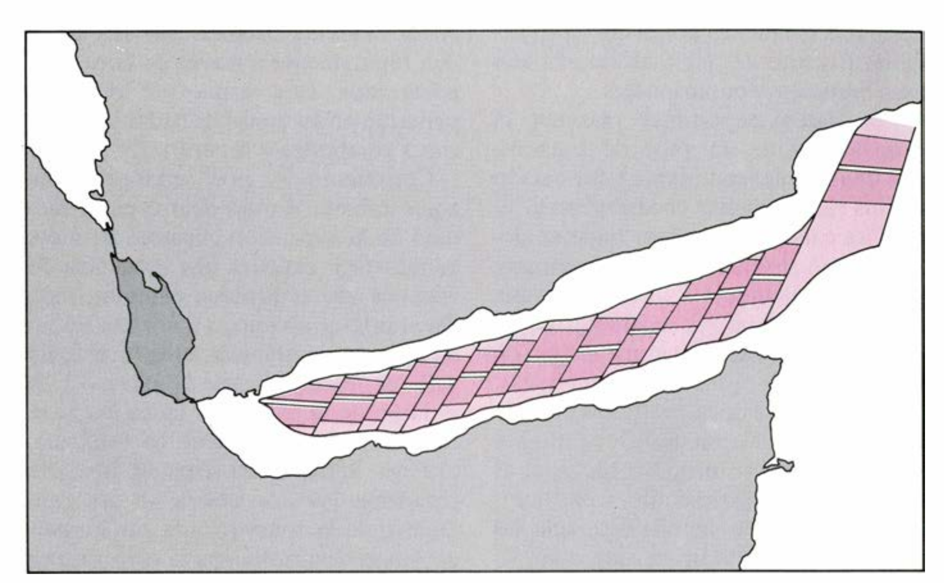


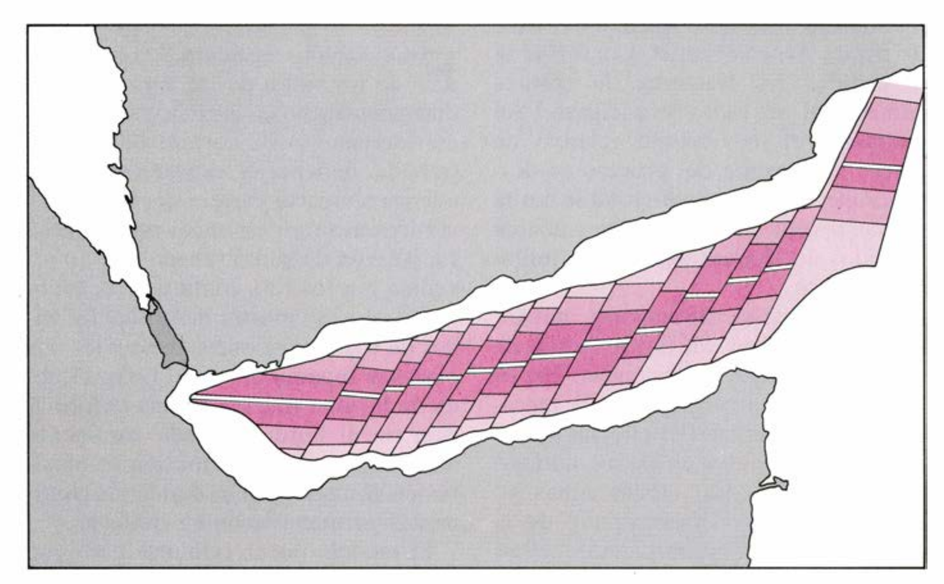
5. PANORAMICA DESDE EL EJE del valle de fractura del golfo de Adén, obtenida mirando hacia el este desde la orilla oeste del lago Asal, situado a 155 metros por debajo del nivel del mar. El rift está flanqueado, a ambos lados, por fallas que discurren paralelas al eje y determinan una serie de escarpes. Esta disposición es muy parecida a la observada en las dorsales mesoceánicas, a casi tres kilómetros de profundidad, por las investigaciones submarinas.

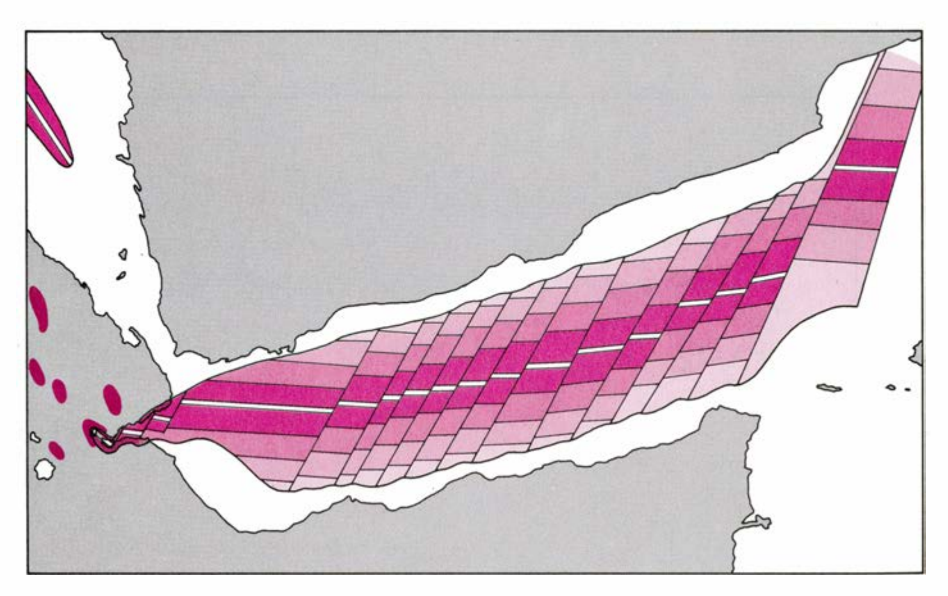
cerrado por entero. Más aún, se aprecia que las placas empiezan a superponerse a 43 grados 30 minutos de longitud Este. Hace diez millones de años, el extremo del rift se hallaba allí. Lo que explica la observación hecha por A. S. Laughton y sus colegas, del Instituto Nacional de Oceanografía de Inglaterra, en 1970, y confirmada recientemente por James R. Cochran, del Observatorio Geológico Lamont-Doherty, según la cual no se encuentra la anomalía 5 ni anomalías más antiguas al oeste de los 43 grados 30 minutos de longitud Este.

También aparecen solapamientos en las reconstrucciones del Atlántico Norte realizadas por Vink, uno de los firmantes de este artículo. En concreto, el solapamiento del norte de Groenlandia y Spitsbergen indica que el borde de cada uno de esos trozos de terreno se estiró por lo menos 10 kilómetros. Otro ejemplo lo constituye el ajuste de América del Sur y Africa. La reconstrucción clásica se debe a Sir Edward Bullard, de la Universidad de Cambridge. Bullard utilizó la curva de nivel de 1000 metros de profundidad del Atlántico para representar el borde de ambos continentes. A continuación, efectuó la rotación de las líneas. Un programa de ordenador determinó el ajuste que minimizaba huecos y solapamientos. A pesar de ello, quedaba un hueco de 250 kilómetros entre el extremo sur de Africa y el borde de una plataforma submarina que incluía las islas Malvinas. El Proyecto de Perforación de las Profundidades Submarinas (*Deep-Sea Drilling Project*) de la Institución Oceanográfica Scripps demostró después que la plataforma de las Malvinas era corteza continental. Se trata de una porción sumergida de América del Sur. No puede haber existido hueco, sino que, cuando se cierran en una reconstrucción, entre América del Sur y Africa se produce solapamiento.

En cualquier caso, las exploraciones magnéticas del Atlántico Sur ponen de manifiesto que las anomalías magnéticas más antiguas del fondo oceánico no son paralelas a los bordes de América del Sur y de Africa. Las mediciones confirman que el Atlántico Sur se abrió por la propagación de valles de fractura. Las anomalías magnéticas más antiguas (una de 135 millones de años de edad, próxima al borde de Africa, y otra de 127 millones de años, cercana al borde de América del Sur) se encuentran únicamente en el extremo sur de dicho océano. Por consiguiente, el fondo del Atlántico se expandía por el sur al tiempo que Africa y América del Sur







6. RECONSTRUCCIONES DEL GOLFO DE ADEN, tal como debió ser 10 millones de años (*arriba*) y siete millones de años (*centro*) atrás. Se parte del mapa actual de anomalías del fondo del golfo (*abajo*) eliminando las anomalías posteriores a esas edades. La dirección de propagación del rift (de este a oeste) es evidente. La superposición de Arabia y Africa (*gris oscuro*) muestra que las placas se estiraron mientras se desarrollaba el valle de fractura. En el mapa del estado actual, varias alineaciones de actividad volcánica (*color intenso*) indican deformación por delante del extremo del valle. El rift del mar Rojo queda arriba, a la izquierda, en el mapa contemporáneo; está flanqueado por anomalías magnéticas.

permanecían unidas por el norte. El valle de fractura no había alcanzado aún esas latitudes septentrionales.

Los datos disponibles plasman la propagación de un valle de fractura, con división del continente y formación de una nueva cuenca oceánica, en el siguiente cuadro: en primer lugar se desarrolla un sistema de fracturas en una placa, posiblemente a lo largo de una zona de debilidad ya existente, como una antigua zona de sutura (lugar de una primitiva colisión de continentes), un gran sistema de fallas transcurrentes (sistema de fallas con deslizamiento horizontal) o, como propuso Morgan, el rastro de un punto caliente. Consideremos, por mor de simplicidad, que las fracturas se localizan en una zona lineal, afectando a una anchura de 200 kilómetros, tal como ocurre en el valle de rift de Africa oriental. Conforme se desarrollan las fracturas, la corteza continental se estira y adelgaza. Sin embargo, el movimiento relativo de placas que resulta del proceso es despreciable: el estiramiento total se limita a unas decenas de kilómetros y abarca períodos de algunas decenas de millones de años.

Al progresar el estiramiento, aumentando la longitud del futuro borde de placa, disminuye la resistencia. No es probable, sin embargo, que este mecanismo sea uniforme. Por ello, las placas permanecen unidas en cierto número de "zonas trabadas". Estas zonas no pueden impedir la fracturación de la corteza que se encuentra entre ellas, por lo que empieza a intruir corteza oceánica basáltica. En resumen, se crean valles de fractura, que se extienden rápidamente a través de la corteza adelgazada. Los vértices de los valles penetran en las zonas trabadas y empiezan a romperlas y separarlas.

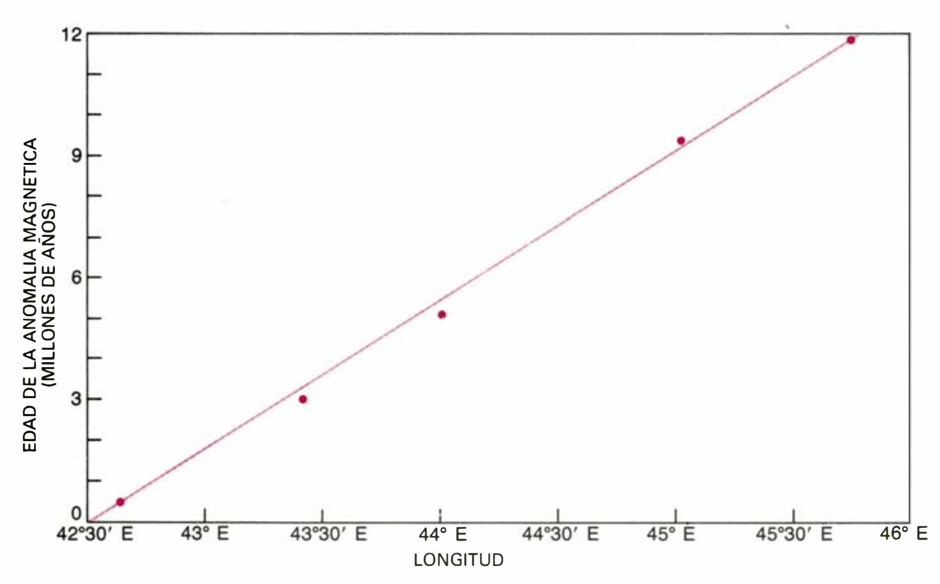
Consideremos, por separado, una zona trabada. Como ocurre en el modelo de la expansión oceánica de Hey, es más fácil explicar una secuencia de estadios que el proceso continuo real. En el primer estadio, a una zona trabada llega, por cada lado, el vértice de un valle de fractura [*véase la figura 8.*]. A lo largo de la extensión de cada rift se está creando nueva corteza oceánica, que va llenando el espacio liberado conforme las dos placas se separan. Dentro de la zona trabada, sin embargo, no se desarrolla nueva corteza, por lo que aquélla debe estirarse.

En el estadio siguiente, los extremos de los valles de fractura se introducen un trecho en la zona trabada. En ese incremento, la corteza de la zona trabada detiene el estiramiento; comienza a crearse corteza oceánica. Los vértices avanzan entonces otro trecho. La porción de zona trabada aún no invadida por los rifts continúa estirándose. El proceso avanza hasta que los valles de fractura se encuentran y las dos placas se separan del todo. Lo que queda de la zona trabada es una deformación en el borde de cada continente neoformado. La deformación es máxima en el último punto donde los continentes permanecieron en contacto.

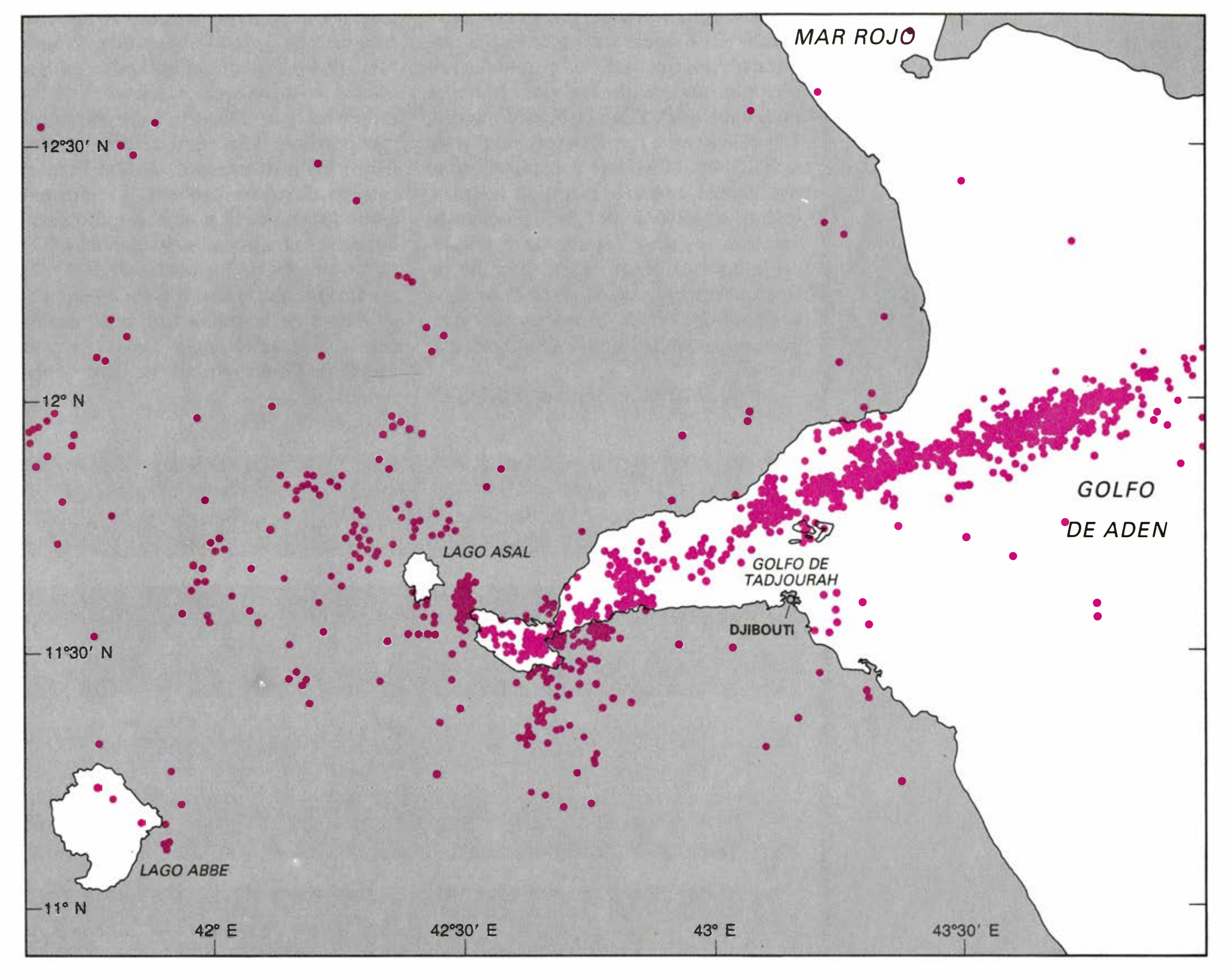
El modelo puede refinarse para que el proceso sea continuo. Es obvio que, si en el transcurso del tiempo cambiase algún parámetro, verbigracia, la velocidad a la que se propaga el valle de fractura, las deformaciones del borde del continente producirían configuraciones diversas. Por ejemplo, la silueta de ciertos solapamientos que se producen al hacer coincidir los bordes de los continentes que se han separado sugiere que los valles de fractura en crecimiento remiten su velocidad al iniciar la penetración en una zona trabada y luego se aceleran en la última fase de ruptura. (El resultado en tal caso es una zona deformada con un vértice alisado.) El modelo predice que la deformación de una placa continental que se rompe tiene lugar en una franja de unos 100 kilómetros de ancho en el margen de cada una de las placas de nueva formación, y también en las zonas trabadas, que se estiran de un modo espectacular. El resquebrajamiento de la corteza en una zona trabada puede explicar la ausencia de anomalías magnéticas intensas en la zona de calma magnética de Afar.

Aceptando que Afar sea una zona trabada en vías de deformación, queda por identificar el valle de fractura que acompaña al que abrió el golfo de Adén. El Valle del Rift del este de Africa, que tiene una larga historia de leves movimientos, probablemente sea un rift abortado, y no constituye el candidato ideal. El del sur del mar Rojo, más reciente y activo, encierra mayores posibilidades. Ron W. Girdler y Peter Styles, a la sazón en la Universidad de Newcastle upon Tyne, intentaron identificar las anomalías magnéticas del mar Rojo para correlacionar esa expansión oceánica con la del golfo de Adén. El esfuerzo se vio complicado por la intrincada estructura de fallas del fondo del mar Rojo y por la baja velocidad con que se abre. Hasta ahora, Girdler y Styles han reconocido dos probables fases de apertura, una ocurrida entre hace 30 y 15 millones de años, y otra, reciente, que empezó hace cinco millones de años y continúa en la actualidad. La cartografía magnética realizada por Hans A. Roeser, del Instituto de Geología y Recursos Naturales de Hannover, muestra una zona de anomalías oceánicas en forma de *V* en el mar Rojo, muy parecida a la del golfo de Adén. La zona de calma magnética del mar Rojo parece corresponder a la fase de expansión antigua.

El vértice del supuesto valle de fractura que está abriendo el mar Rojo se halla ahora entre 15 y 16 grados de latitud Norte. Su distancia al extremo del rift de Asal-Adén es de 300 kilómetros. Probablemente sea esta la porción de la zona trabada de Afar que queda por



7. VELOCIDAD DE PROPAGACION del valle de fractura del golfo de Adén, deducida de las reconstrucciones. Cada punto representa la posición del extremo occidental de una anomalía (*eje horizontal*) y la edad de la anomalía (*eje vertical*). La pendiente de la línea que une los puntos indica una velocidad de tres centímetros por año. La prolongación de la línea a una edad cero y una longitud de unos 42 grados 30 minutos demuestra que el extremo del rift queda ahora en el lago Asal. (Dibujos de Andrew Tomko.)



8. EPICENTROS DE TERREMOTOS en la región de Afar, registrados de 1974 a 1980 por investigadores del Institut de Physique du Globe de París. Confirman la posición del valle de fractura. Los epicentros dispersos del oeste del extremo del rift indican que en esa zona la corteza se está deformando.

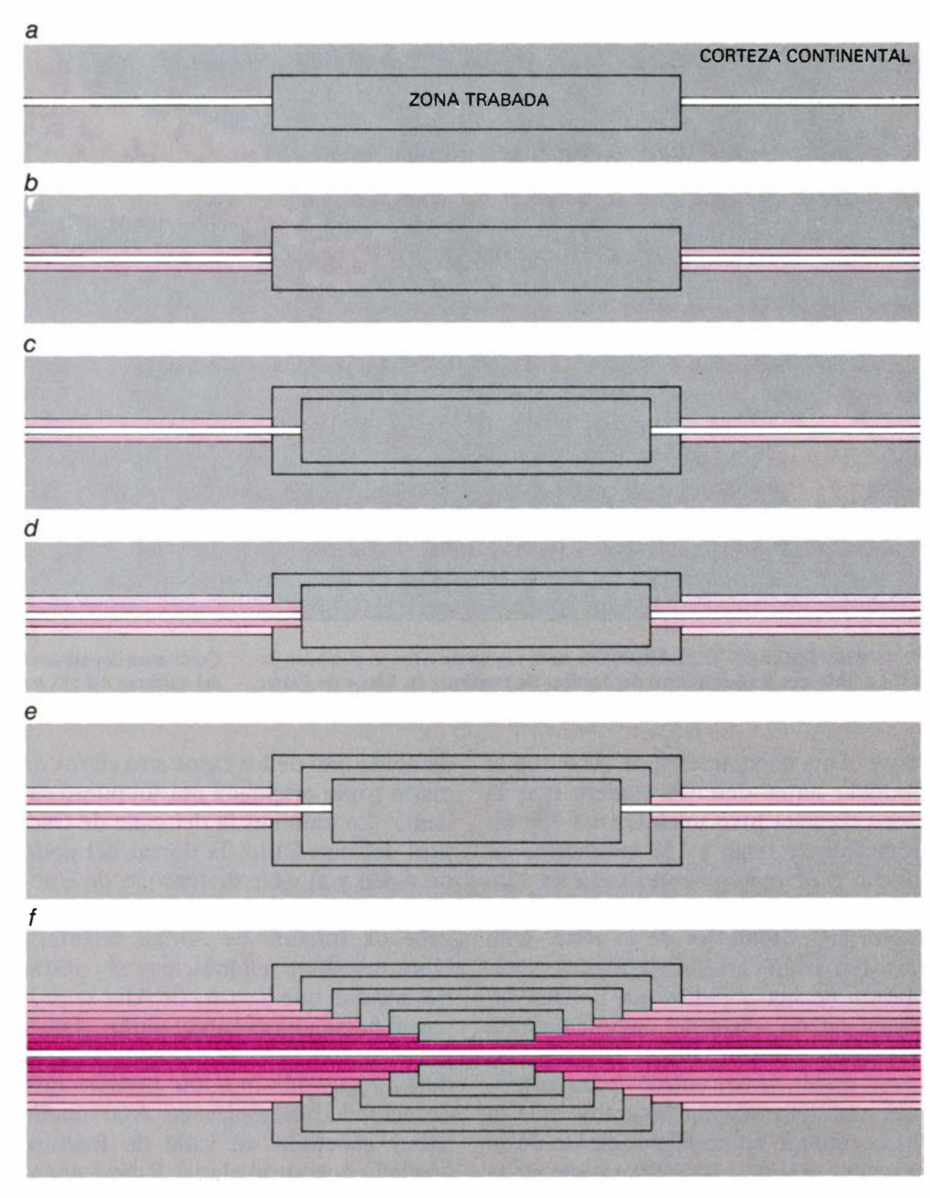
abrir. Una comparación de Afar con el modelo antes descrito sugiere que la zona trabada tuvo inicialmente 750 kilómetros de largo y 150 kilómetros de ancho. Por consiguiente, cada uno de los rifts que se propagan ha rasgado hasta 200 kilómetros de la zona. Una extrapolación de velocidades de propagación normales indica que la zona cerrada puede separarse completamente en menos de 10 millones de años. La zona puede haber sufrido para entonces una deformación promedio que la haya estirado en un 80 por ciento de su anchura original. La última parte de la zona de ruptura puede haberse estirado el doble de ese valor.

¿Cómo encajan los descubrimientos de Afar en la teoría de Wilson, Burke y Dewey según la cual la fracturación guarda relación con el abombamiento y ruptura de la corteza continental situada encima de un punto caliente del manto? Afar se ha considerado reiteradamente uno de los casos más claros de unión triple originada por un punto caliente. La unión es la del valle de fractura del mar Rojo, la dorsal del golfo de Adén y el valle de fractura de Etiopía (la porción más septentrional del valle de fractura de Africa oriental). Nuestras observaciones, por el contrario, indican que los rifts de Afar se propagan hacia una eventual unión, y no a partir de ella. Uno de nosotros (Courtillot) ha sugerido que una primera fase de actividad tectónica en Afar puede haber generado un valle de fractura acodado que abrió el mar Rojo y abandonó el Valle del Rift en el este africano. Zonas de debilidad preexistentes y heterogeneidades en la composición de la corteza pudieron ser las responsables del "codo". Una segunda fase de actividad, todavía en proceso de desarrollo, pudo abrir después el golfo de Adén y producir el segundo episodio de apertura del mar Rojo. Nuevamente aparece un valle de fractura en forma de codo pero, hasta que no se produzca la división completa de la zona trabada de Afar, la fracturación no habrá acabado. La unión de Afar puede, por tanto, ser la unión de dos rifts acodados.

Habrán de desvelarse otros valles de fractura que se propagan a través de un continente al que rompen y dividen. El golfo de California es un probable candidato, pese a que su escala, relativamente pequeña, y su degradación por fallas transformantes dificultan la interpretación de los datos magnéticos. Merece la pena descifrar el proceso de propagación de los valles de fractura. Por una parte, porque la fracturación de los márgenes continentales y la subsiguiente deposición de sedimentos en ellos rigen la evolución de las formaciones petrolíferas; además, el estudio de la proyección de los valles de fractura permitiría una aproximación a las pro-

piedades mecánicas de la corteza continental. El modelo de fracturación que separó América del Sur y Africa, por ejemplo, sugiere que las zonas trabadas miden unos 400 kilómetros de longitud, 150 de anchura y están espaciadas a intervalos de 700 kilómetros, por término medio. El modelo postula, además, que la expansión del fondo oceánico empieza (es decir, comienza a emplazarse corteza oceánica en un valle de fractura) cuando un 65 por ciento de la longitud del futuro límite de placa ha perdido resistencia para oponerse a la ruptura.

Al dilucidar el resquebrajamiento de una placa a lo largo de miles de kilómetros, hemos tratado con escalas temporales de no más de un millón de años y escalas espaciales de centenares de kilómetros. En ambas escalas encontramos corteza continental deformándose. Entre los instrumentos que facilitan el estudio de cómo procede la deformación, dos son decisivos: el estudio detallado de las anomalías magnéticas y el de los bordes de los continentes. En la medida en que la investigación haga caso omiso de la supuesta rigidez de las placas, proporcionará una imagen mejor de cómo evolucionan los continentes.



9. FRACTURACION DE UN CONTINENTE en dos placas, representada en etapas de acuerdo con el modelo de uno de los autores (Courtillot). El proceso se inicia a lo largo de una zona de debilidad anterior. Sin embargo, la corteza es heterogénea y algunas zonas se resisten. Se ha esquematizado una de esas "zonas trabadas" que impide que los valles de fracturan se junten (*a*). En los valles, a lo largo de toda su extensión, intruye nueva corteza oceánica. La nueva corteza rellena el espacio ganado a causa de la incipiente separación de las placas. La zona trabada, en cambio, se ensancha (*b*). Los vértices de los valles empiezan a invadir la zona (*c*). Se crea más corteza oceánica; la zona trabada restante se ensancha de nuevo (*d*). Los vértices de los valles se aproximan un nuevo trecho (*e*). Finalmente, los valles se juntan y las placas se separan (*f*). La zona trabada se ha convertido en una deformación del borde de cada nuevo continente. El modelo puede representarse cual proceso continuo en el que la extensión de la zona trabada y la velocidad de los extremos de los valles cambian con el tiempo. Aparecen así distintas deformaciones.



Piscicultura de los salmónidos

La notable adaptabilidad genética de esta familia de peces, que abarca salmones y truchas, permite recuperar poblaciones agotadas, establecer comunidades nuevas y explotar criaderos

Lauren R. Donaldson y Timothy Joyner

Hace miles de años, los peces de la familia de los Salmónidos, grupo que incluye salmones y truchas, prosperaban en todo el hemisferio norte, en lagos, ríos y arroyos de aguas frías y en el mar abierto. En tiempos ya históricos, la mano del hombre alteró el panorama; tras siglos de actividades que terminaron por destruir sus hábitats, a consecuencia de una pesca intensiva, los salmónidos han desaparecido hoy de muchas masas de agua; en otras, su número se ha reducido considerablemente. No obstante, varios logros técnicos recientes prometen una excelente oportunidad de contener o incluso invertir la tendencia hacia el agotamiento de esas poblaciones. Tales avances se basan en su notable adaptabilidad genética y en la capacidad de los piscicultores para sacar partido de tamaña plasticidad.

La familia de los Salmónidos comprende miles de razas, repartidas en más de 60 especies. Cada raza está adaptada a un ambiente único. Esta diversidad ofrece a los piscicultores un acervo enorme de material genético del que pueden seleccionarse caracteres deseables: tamaño y forma, tasa de crecimiento, color, sabor y textura de la carne, tolerancia al agua dulce o salada y calendario y pautas de migración.

Conocedores de esas propiedades, los criadores han conseguido ya varios resultados significativos: (1) que los salmónidos retornen para frezar, después de haber pasado un período en el mar, a cualquier masa de agua fría donde se les haya soltado como murgones, lo que significa que se les puede instalar o reinstalar en masas de agua que no ocupan todavía; (2) adaptación de algunas especies a vivir todo el año en agua dulce, aunque transcurra la mayor parte de su vida en el mar, y (3) acuicultura de algunas especies.

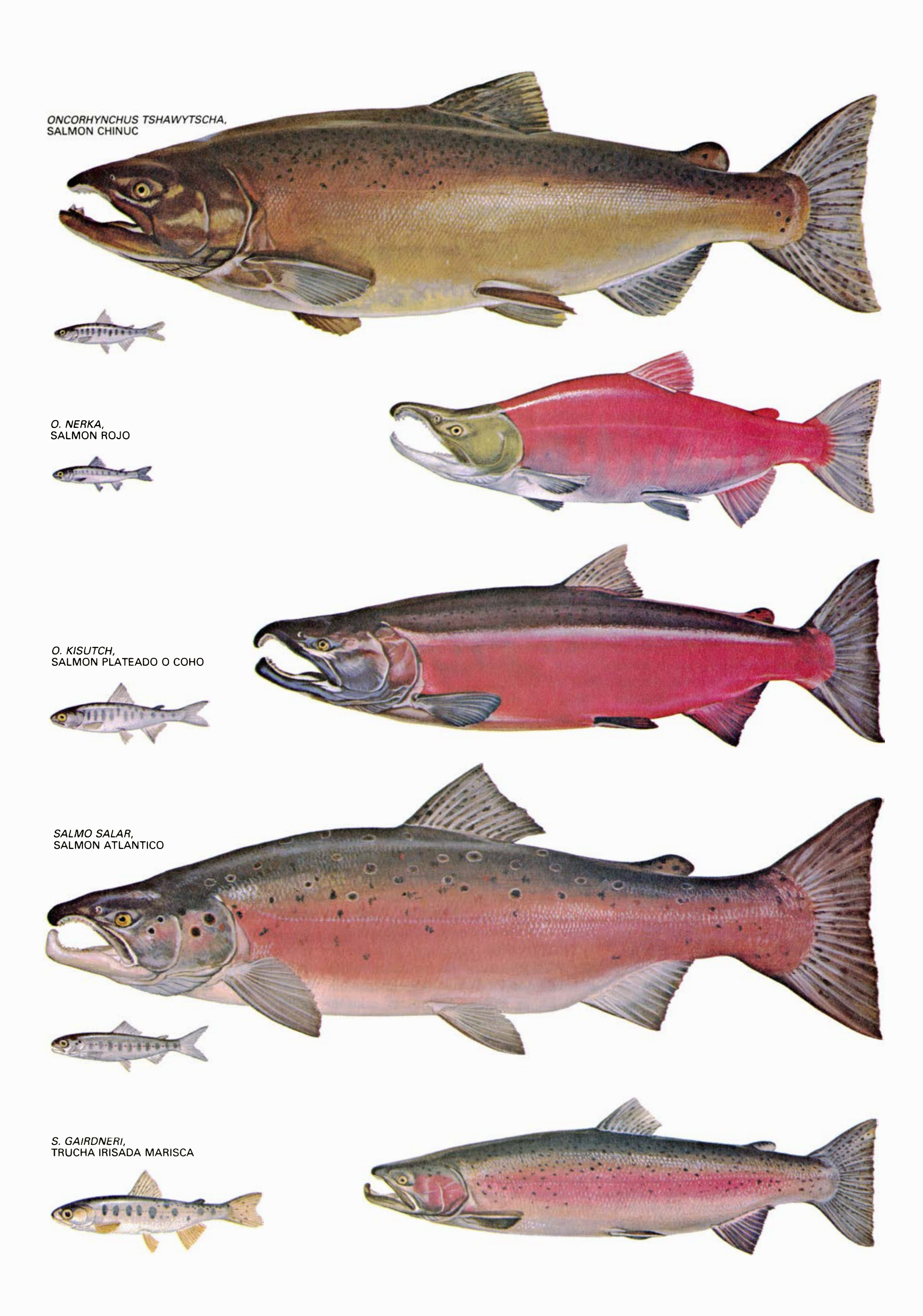
Salmones explotados en criaderos retornan en gran número a sus lugares de liberación en Norteamérica, Japón y Siberia. Se han trasplantado, con éxito, a Chile. Los fiordos y canales del archipiélago chileno poseen abundantes poblaciones de plancton de las que pueden alimentarse las poblaciones de salmón recién trasplantadas. En el futuro, poblaciones cuidadosamente seleccionadas, implantadas en el extremo austral de Sudamérica, migrarán hasta el límite del Antártico, para alimentarse de las concentraciones estivales de *krill* y devolver ese recurso a los lugares de suelta, espléndidamente empaquetado en forma de carne de salmón de color rojo vivo. Los salmones introducidos en los Grandes Lagos norteamericanos se han ajustado a este hábitat dulceacuícola mejor de lo que muchos esperaban. A lo largo de las costas rocosas de Escocia y Noruega, los piscicultores crían salmones y truchas arco iris de gran tamaño en ensenadas marinas, fiordos cerrados y en rediles flotantes.

Se conoce bastante bien cuál era la distribución natural de los Salmónidos antes de que los humanos incidieran en ella. En el género *Salmo*, el salmón atlántico o europeo (*Salmo salar*) y las especies de truchas europeas se encontraban alrededor de las orillas del Atlántico Norte y en las regiones adyacentes del océano Artico. Las especies de trucha irisada (*Salmo gairdneri*), marisca (*steelhead*) y de Clark *S. clarki* se encontraban a lo largo de las costas del Pacífico Norte. Los salvelinos, miembros del género *Salvelinus*, vivían bordeando las cuencas septentrionales del Atlántico y del Pacífico y en las que vertían al océano Artico. Las seis especies de salmones del Pacífico (género *Oncorhynchus*) se hallaban originariamente limitadas a las márgenes del Pacífico Norte, desde Taiwán hasta California, incluidos los mares de Bering y de Ojotsk y las regiones adyacentes del océano Artico.

Todos los Salmónidos hacen eclosión en agua dulce, donde pasan al menos sus primeras semanas. Algunos miembros de los tres géneros son anádromos: migran al mar, recorridas con frecuencia grandes distancias, antes de retornar a sus arroyos nativos a frezar. El salmón atlántico retorna un año tras otro a frezar; los salmones del Pacífico vuelven una sola vez y mueren después de la puesta. Algunas especies de salmónidos permanecen toda su vida en aguas dulces. Varias especies del Pacífico se adaptan fácilmente a vivir, de forma permanente, en agua dulce. Hay poblaciones relictas de salmones rosados y rojos que sobreviven en lagos que se separaron del mar hace miles de años.

La capacidad de retornar al hogar de los salmónidos migradores es legendaria. Remontan el río muchos kilómetros, brincando en el aire para trepar cascadas y saltos, e infaliblemente superan todos los recodos hasta llegar a la corriente de agua que les vio nacer. Hace algunos años, Arthur D. Hasler y James A. Larsen, de la Universidad de Wisconsin en Madison, demostraron que los peces retornaban al hogar mediante el olfato, distinguiendo la rúbrica química única de su arroyo nativo en

1. RETORNO DE SALMONES por el río Tazimina, en Alaska. Según se aprecia en la fotografía, ocupan gran parte del cauce. Se trata en este caso de salmones rojos (*Oncorhynchus nerka*), que vuelven al lugar donde salieron del huevo. Abandonaron el río cuando tenían de dos a cuatro años de edad, vivieron de uno a tres años más en el mar y ahora retornan para frezar; siguen el camino de regreso gracias al "olor" químico único de su río de origen. Los peces situados en filas en los bordes del río están descansando antes de continuar curso arriba. Se forman filas al orientarse los salmones río arriba; su gran número les obliga a disponerse en apretada formación. Los demás ejemplares escarban nidos en la grava. La fotografía se tomó en un reconocimiento anual destinado a pronosticar, para los pescadores comerciales y las autoridades responsables, cuántos salmones rojos, de todos los que eclosionaron en el río, llegarán a la meta.


ONCORHYNCHUS TSHAWYTSCHA,
SALMON CHINUC
O. NERKA,
SALMON ROJO
O. KISUTCH,
SALMON PLATEADO O COHO
SALMO SALAR,
SALMON ATLANTICO
S. GAIRDNERI,
TRUCHA IRISADA MARISCA

concentraciones muy diluidas, de hasta partes por mil millones. Esta rúbrica procede de las rocas, el suelo y la materia orgánica asociada al agua.

Los intentos de cría artificial de salmónidos se iniciaron, en Alemania, cuando lo único que se sabía del proceso de retorno al hogar era que éstos lo realizaban con gran éxito. En 1763 se observó que se podían extraer huevos de las hembras, comprimiéndolas, fecundarlos con esperma de machos e incubarlos en agua fría corriente hasta que hacían eclosión. Los primeros investigadores trabajaron con la trucha común europea (*Salmo trutta*) y el salmón atlántico (*S. salar*). En los Estados Unidos, los intentos de cultivo de salmónidos comenzaron en 1804, con la freza e incubación artificiales de la trucha de fontana o salvelino (*Salvelinus fontinalis*).

En 1870 se construyó en California, en el río McCloud, el primer criadero o piscifactoría de salmones del Pacífico. Al igual que en intentos anteriores de propagación, se despojó al río de su población salvaje, pues se pescaron con jábega los peces en freza en sus terrenos ancestrales de desove, con el fin de obtener la "semilla" para el criadero. Se siguió la misma práctica en todas las piscifactorías que posteriormente se establecieron en la costa del Pacífico, de California al Japón. Los criadores se preocupaban únicamente de la incubación de los huevos, sin prestar atención a los problemas de alimentación y cría de los alevines, que se liberaban sin estar preparados para los riesgos de un ambiente hostil. En consecuencia, esos primeros esfuerzos contribuyeron poco a las arribazones de salmón y, de hecho, con frecuencia las perjudicaron.

En 1895, el estado de Washington construyó un criadero en el río Kalama, tributario del Columbia. La estación se especializó en el chinuc (*Oncorhynchus tshawytscha*), el mayor de los salmones pacíficos. En ese centro se pusieron a punto procedimientos para la freza, eclosión, cría, suelta y recaptura de los peces que iban a frezar, y obtener así huevos para la siguiente generación; ese abanico de acciones permitió recargar las arribazones de salmón. A medida que el sistema se desarrollaba, comenzó a rendir freza excedentaria, que podía transferirse a otras estaciones para iniciar nuevas arribazones.

En 1901 se construyó un criadero de salmón en el Green, un riachuelo que se adentra en Puget Sound por el puerto de Seattle. Se llevaron allí huevos de chinuc de la piscifactoría de Kalama para iniciar una nueva arribazón. Después de un período de ajuste, los chinucs empezaron a retornar al criadero del río Green en tal número que pronto se dispuso de excedentes. La piscifactoría del río Green se convirtió en fuente de huevos de chinuc para muchos otros criaderos de la zona de Puget Sound, incluyendo (en 1949) la piscifactoría experimental de la Universidad de Washington. Los chinucs, junto a las poblaciones de trucha arco iris, trucha de Clark y salmón plateado ya establecidas allí, proporcionaron a la universidad sus propios "rebaños" de salmónidos y posibilitaron el desarrollo de varios proyectos experimentales.

Era práctica común entre los investigadores de otros centros preparar recetas específicas de productos químicos que había que añadir al agua donde se soltaban los jóvenes salmónidos para asegurarse de que volvieran. En la Universidad de Washington aprendimos pronto que ello no era necesario; bastaba la rúbrica química natural del agua. Un proyecto importante suponía la cría selectiva para aumentar la proporción de salmones chinuc que retornaban al estanque universitario después de pasar dos o tres años en el mar, respecto del número de peces que retornaba a los cuatro o cinco años. El proyecto ha dado resultados muy satisfactorios. Igual ha ocurrido con otro programa destinado a acelerar el crecimiento de salmón plateado juvenil mediante el suministro de dietas especiales y el control de la temperatura del agua. Bajo ese régimen, nuestros salmones coho llegan al estadio de murgón y se dirigen al mar transcurridos sólo seis o siete meses, cuando el período normal es de 18 a 30 meses. En estas poblaciones, y en las técnicas empleadas para criarlas, se apoya la industria de cultivo comercial de salmón que se está desarrollando en los Estados Unidos, Canadá, Chile y Francia.

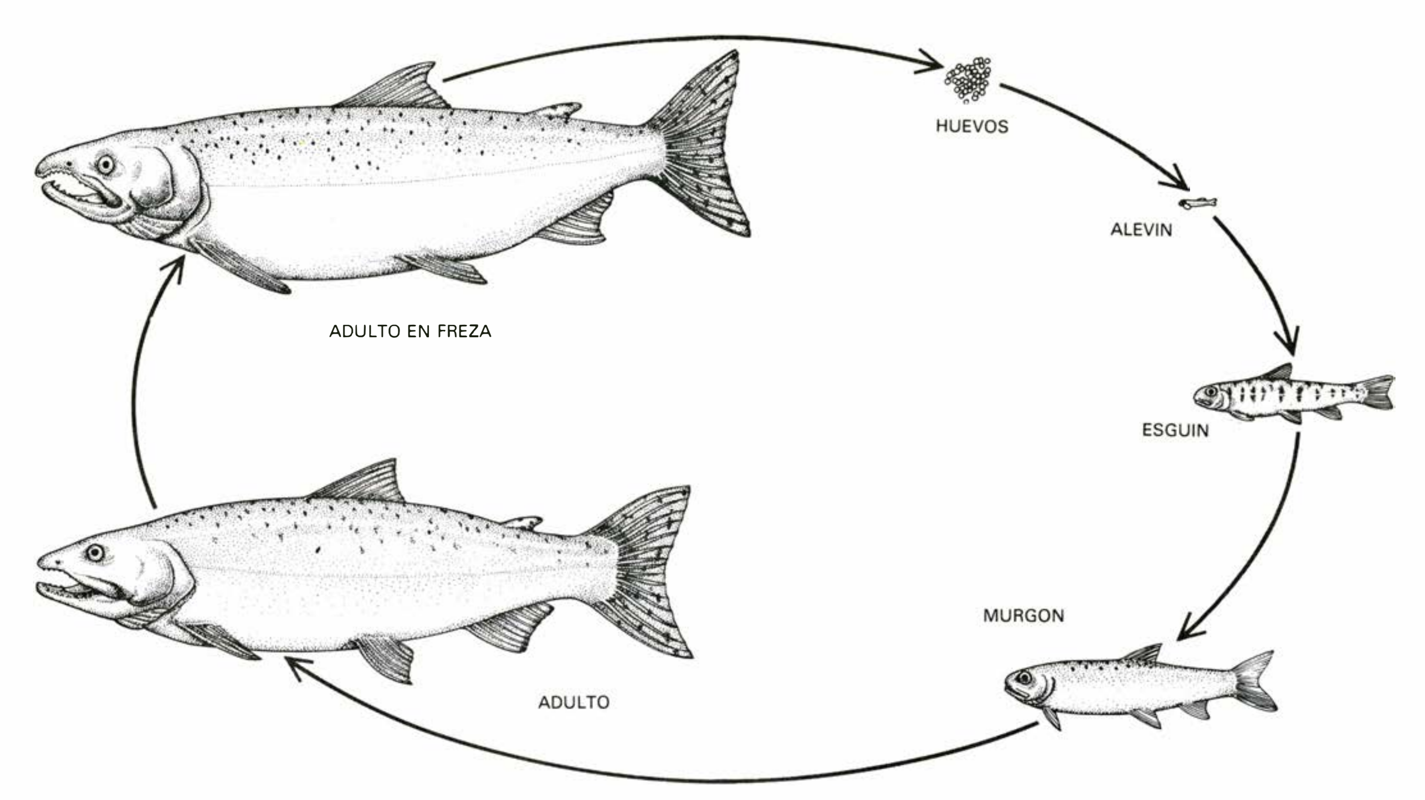
Los salmones chinuc llevados a la universidad tuvieron que adaptarse a un ambiente muy distinto de los que suele frecuentar esta especie. En lugar de atravesar ríos grandes y profundos, como el Sacramento, Columbia, Fraser y Yukon, familiares a muchos de sus parientes, los chinucs que retornan del mar a su "hogar" en la universidad tenían que penetrar en Puget Sound, girar a la izquierda, tomar el canal para barcos del lago Washington y pasar por las compuertas, ya sea con el tráfico naviero o bien mediante la escala para peces que hay a lo largo de la orilla meridional. Luego, después de un viaje de seis kilómetros a través de la congestionada zona industrial que se extiende a lo largo de las costas del lago Union, debían girar de nuevo a la izquierda, trepar por una pequeña escala y penetrar en un estanque de reunión de la estación universitaria.

El agua de atracción que guía a los peces hasta esta última etapa de su recorrido se bombea desde el canal para barcos hasta el estanque de reunión; de la balsa, por gravedad, fluye de nuevo al canal. Este minúsculo flujo ha servido de arroyo natal para muchas generaciones de salmones y de trucha marisca criados en la estación. Los salmones chinuc de la universidad se han adaptado tan bien a este ambiente insólito, que cada otoño retornan al estanque, después de soportar una fuerte pesca comercial y deportiva en el océano, y superar el estrecho de Juan de Fuca y Puget Sound, una población suficiente para producir de 10 a 20 veces el número de huevos precisos para perpetuar la arribazón.

Los huevos sobrantes han servido para constituir muchas otras arribazones de salmones. Desde 1967 hasta 1970 se enviaron a Michigan varios cientos de miles de huevos ojosos (huevos en los que se ven los ojos en desarrollo y que constituyen el estadio más temprano en que, con cuidado, pueden manipularse los huevos sin dañarlos); se emplearon de semilla de poblaciones que se han convertido en la base de la nueva y vigorosa pesquería deportiva de chinucs que se ha desarrollado en el lago Michigan. En 1970 se enviaron huevos al Departamento de Conservación Ambiental del Estado de Nueva York para sembrar con chinucs los lagos Erie y Ontario.

En 1980 se mandaron a Chile huevos ojosos de la población de chinucs de la universidad. Los pececillos que salieron de los huevos se soltaron en aguas que llegan a la zona de los canales australes de ese país; existe allí un

2. CINCO ESPECIES de Salmónidos, familia de peces que incluye los salmones y las truchas, se ilustran, a la misma escala, en la página opuesta. Todos son machos; a la derecha se muestran en la edad de la freza y, a la izquierda, como jóvenes esguines, todavía en la corriente de agua dulce donde salieron del huevo. No mucho después del estadio de esguín, los peces se convierten en murgones, es decir, pasan a través de los cambios fisiológicos que permiten su migración al mar y la supervivencia en agua salada. Las tres especies de arriba son salmones del Pacífico, que retornan sólo una vez a su río nativo para frezar. El salmón del Atlántico y la trucha arco iris retornan cada año a frezar durante un período largo.

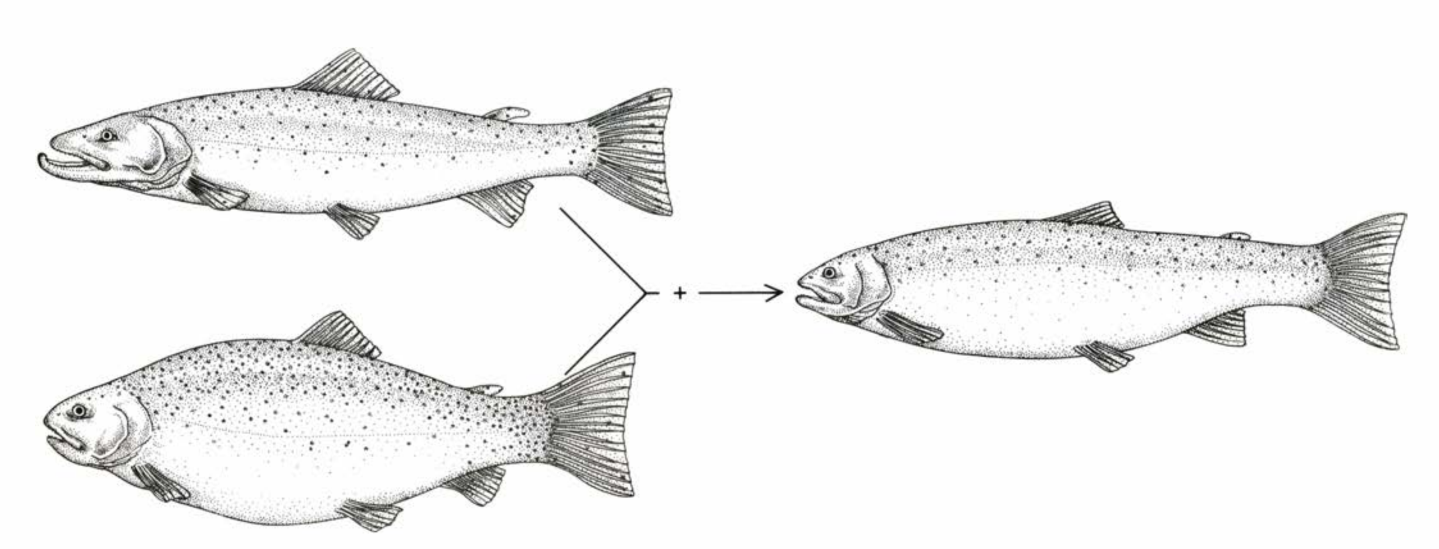


3. SEIS ESTADIOS de la vida del salmón plateado o coho (*Oncorhynchus kisutch*, dibujados a la misma escala: los huevos; el alevín, al que se halla fijado aún el saco vitelino; el esguín, un juvenil moteado que todavía vive en agua dulce; el murgón, un pececillo plateado, listo para migrar al mar; el adulto maduro a punto de volver del mar y el salmón plateado adulto después de haber retornado a su río nativo para frezar. (Ilustración de Sally Black.)

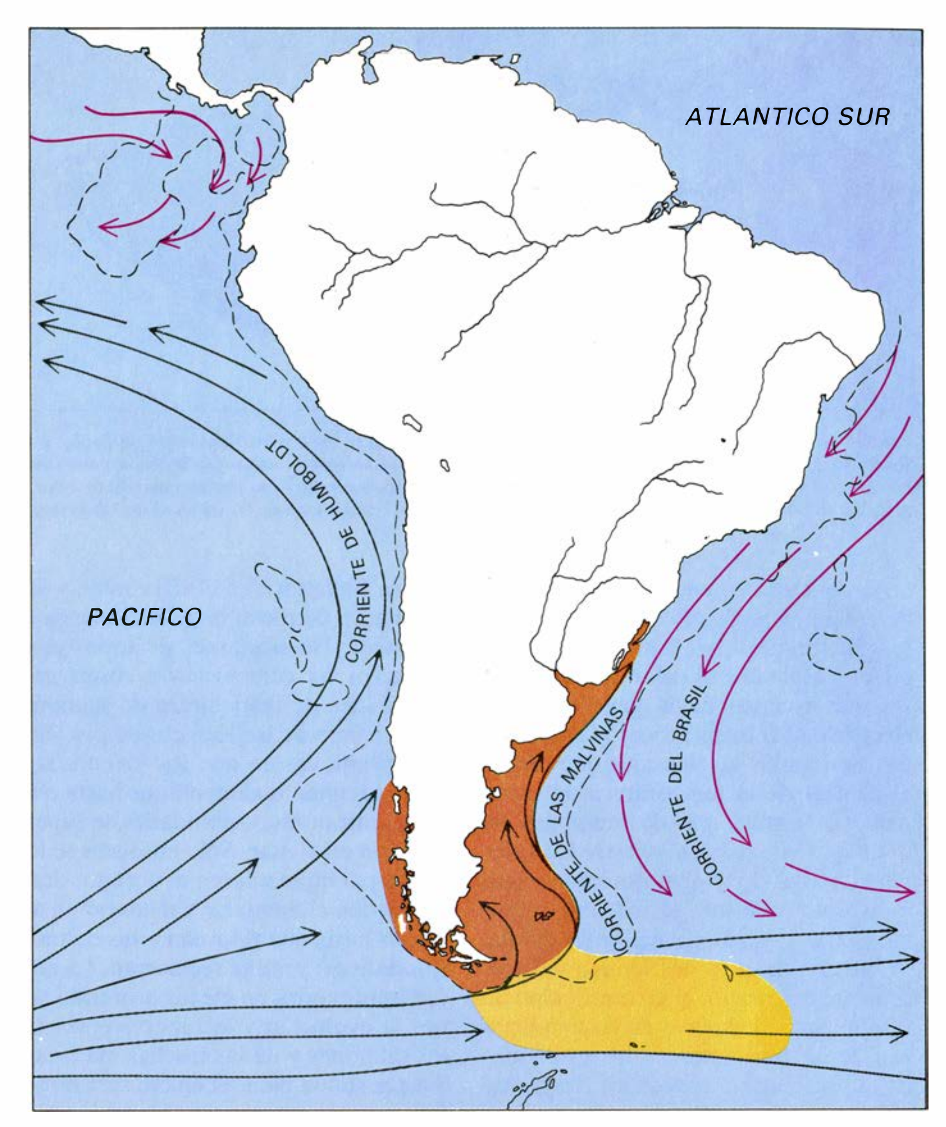
abundante plancton de pequeños cangrejos y camarones, un recurso alimentario ideal para el salmón. Dos años más tarde, los promotores chilenos y estadounidenses del proyecto quedaron encantados por un retorno de chinucs adultos que excedía con mucho sus modestas previsiones. En la actualidad, estos peces proporcionan huevos para un programa de repoblación extensiva que pronto incluirá sueltas en el estrecho de Magallanes. El salmón que se aventure hasta alta mar desde estas aguas tendrá acceso a las enormes poblaciones de *krill* que en verano se congregan en la región de la convergencia antártica, donde aguas que fluyen procedentes del Antártico se encuentran con aguas más cálidas de las cuencas oceánicas situadas al norte. Los peces también podrán comer en las aguas ricas en plancton de la plataforma patagona, que les resultará más acogedora durante el invierno.

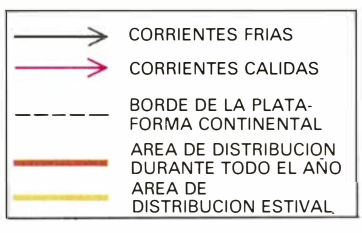
Los chinucs no son los únicos salmónidos cuyo número ha aumentado mediante estas técnicas. También han dado fruto los programas aplicados al salmón plateado o coho (*Oncorhynchus kisutch*), al salmón rosado o jorobado (*O. gorbuscha*), al salmón keta o perro (*O. keta*), al salmón atlántico (*Salmo salar*) y a la trucha arco iris (*S. gairdneri*).

En tiempos históricos, los salmones plateados se distribuían desde el Artico



4. HIBRIDACION DE TRUCHAS realizada en la Universidad de Washington. Se utilizó esperma de truchas arco iris anádromas (migradoras), llamadas *steelhead*, para fecundar óvulos de una población selecta de truchas arco iris no migradoras desarrollada en la universidad. El macho *steelhead* aparece arriba, a la izquierda. El híbrido resultante crece más deprisa que las truchas *steelhead* y menos que las truchas arco iris no migradoras. También migra, y a su retorno muestra una característica de la trucha arco iris: muerde el cebo, lo que le convierte en una óptima presa para la pesca deportiva.





5. NUEVAS REGIONES OCEANICAS se han abierto al salmón del Pacífico por el trasplante a Chile de huevos procedentes de Norteamérica y Japón. El trasplante que más éxito ha tenido se efectuó en 1980, a partir de la población de *Oncorhynchus tshawytscha*, de la Universidad de Washington. Los retornos de esta población proporcionan la fuente de huevos de un programa de introducción que liberará salmones en el estrecho de Magallanes. El mapa indica posibles áreas de extensión del salmón en el Subantártico.

hasta el centro de California. Puesto que tienden a frezar y a criar a sus hijos en arroyuelos, sus viajes de retorno los dispersaban, y en cada una de las miles de zonas de freza situadas en arroyos y tributarios con acceso al Pacífico Norte se desarrollaron poblaciones o razas únicas de salmón coho.

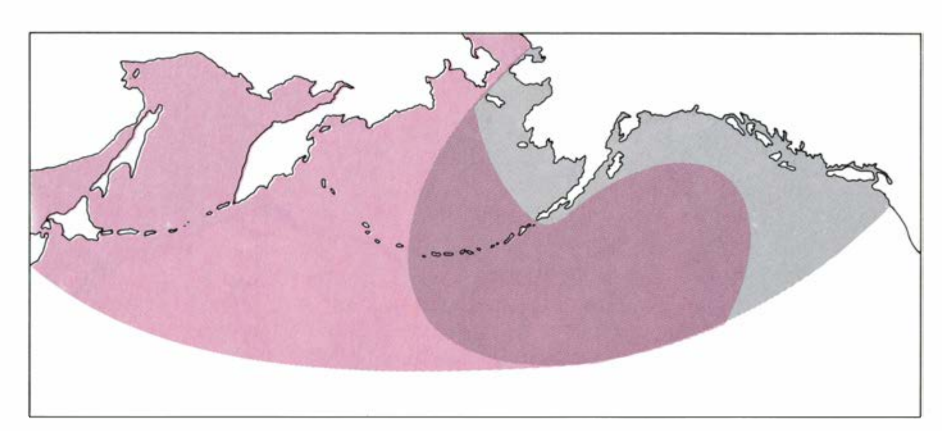
Los salmones plateados adultos retornan a sus arroyos de origen desde las regiones de alimentación oceánicas a finales de otoño, cuando las lluvias estacionales aumentan el caudal y reducen la temperatura del agua. En los largos meses de invierno, los huevos permanecen cubiertos con capas protectoras de grava. Eclosionan entre marzo y junio. Llegado el verano, los jóvenes salmones plateados se alimentan de insectos acuáticos en los riachuelos donde nacieron. En otoño, cuando los adultos retornan a frezar, los juveniles de la primavera precedente se alimentan de los organismos que los peces en freza extraen del fondo al excavar sus nidos. Los jóvenes comen asimismo los huevos que no puedan inmediatamente ser cubiertos por grava.

Durante el segundo invierno, los jóvenes salmones plateados permanecen en el río, casi inactivos. En su segunda primavera, los jóvenes de la parte meridional del área de distribución del coho se convierten en murgones: atraviesan los cambios fisiológicos que les permiten migrar al mar. (Sin estos complejos cambios, los salmones, que tienen un contenido hemático en sales de alrededor de 12 partes por 1000, se deshidratarían al penetrar en el mar, pues el agua de mar tiene un contenido en sales de 30 a 32 partes por 1000.) Los salmones coho permanecen en el mar durante un año y medio, retornando a la edad de tres años para iniciar de nuevo el ciclo. En las partes más frías de su área de distribución, los salmones plateados suelen precisar dos años y medio para alcanzar el estadio de murgón; después de pasar año y medio en el mar, retornan como adultos de cuatro años.

Los salmones plateados han sido el "pan de cada día" para las piscifactorías de salmón de la costa occidental de los Estados Unidos. Los millones de murgones de coho producidos cada año por los criaderos federales, estatales, indios y privados constituyen en la actualidad la mayor fuente individual de salmón para las pesquerías comerciales y deportivas de California, Oregón y Washington. En 1967, uno de nosotros (Donaldson) organizó un pequeño programa de investigación en la Universidad de Washington destinado a determinar si la tasa de crecimiento del salmón plateado podría acelerarse mediante dietas mejoradas y agua caldeada, de modo que se produjeran murgones listos para migrar a los seis o siete meses, en lugar de a los 18. Encontramos que, efectivamente, el objetivo era alcanzable. La mayor parte de los salmones coho soltados como murgones acelerados volvieron al estanque de la universidad después de pasar 18 meses en el mar, es decir, cuando tenían dos años de edad. Seleccionando una población de reproductores a partir de ese grupo aumentamos la tasa de adultos de retorno desde el 1,25 por ciento, en 1969, hasta el 6,42 por ciento, seis años después.

Esta mejora fue el resultado de la aplicación de recientes investigaciones sobre la nutrición de los salmónidos; desarrollamos dietas con las cantidades apropiadas de proteína digerible, grasas, minerales y vitaminas. La principal fuente de proteína ha sido harina de pescado, pero la calidad del producto peruano es baja y los suministros procedentes del hemisferio Norte son cada vez más escasos y caros. Se han empleado como sustitutos, en cantidad variable, levaduras, proteínas vegetales y bacterianas, con resultados asimismo diversos. Los desperdicios procedentes de la elaboración de pescado, conservados por acidificación, parecen muy prometedores.

Para mantener la temperatura del



6. UNA LARGA MIGRACION lleva al salmón perro (*O. keta*), criado artificialmente en Japón y la Unión Soviética, hasta el golfo de Alaska. Los keta asiáticos están representados por la región coloreada, los norteamericanos por la zona gris y, la región en la que ambos coinciden, por una mezcla de color y gris. En su retorno anual a Asia, los keta proporcionan un rendimiento de 80 millones de kilogramos.

agua del criadero en el margen óptimo de crecimiento de los salmónidos (por lo general de 8 a 12 grados Celsius) puede emplearse el calor obtenido como subproducto de la generación de electricidad u otros procesos industriales. Son varias las ventajas que ofrece el control de la temperatura del agua para acelerar la cría de murgones de piscifactorías: pueden evitarse los valores extremos de temperatura en verano e invierno, que son perjudiciales; pueden soltarse los murgones antes de que los niveles de agua desciendan peligrosamente en verano; el menor tiempo de residencia de los peces en las condiciones de hacinamiento de los estanques de la piscifactoría reduce los riesgos de contraer enfermedades; con períodos de cría más cortos se precisa menos alimento y se abrevia el tiempo dedicado a la recolección.

Muchas de las regiones de freza y cría naturales de los salmones ubicadas en las naciones desarrolladas del hemisferio Norte se han perdido por la tala de bosques, labores agrícolas e invasión de las aglomeraciones urbanas e industriales. Varios países se han dedicado a la producción artificial para remplazar a los salmones perdidos por la destrucción de sus hábitats. En los últimos 20 años, los japoneses han alcanzado un éxito notable en la producción de salmón keta en piscifactorías. Casi todos los keta que se pescan en la actualidad en sus aguas territoriales proceden de piscifactorías.

Aunque en Norteamérica y en Europa se ha desarrollado una gama mucho mayor de métodos para la cría artificial de muchas especies de salmones y truchas en piscifactorías, ninguno de ellos se ha aplicado con la tenaz intensidad que ha caracterizado el seguimiento japonés de ese sistema importado de Nueva Inglaterra en el siglo XVIII; y los resultados tampoco han sido tan espectaculares. No obstante, de todos esos esfuerzos ha comenzado a surgir una nueva idea de maricultura de salmónidos. Difiere de las técnicas de piscicultura primitivas en que los jóvenes son cuidadosamente alimentados hasta que se optimizan sus posibilidades de supervivencia en el mar. Sólo entonces se les suelta para que migren al océano, donde pueden alimentarse y madurar en alta mar hasta que retornan a sus costas y ríos nativos; y allí se recolectan. La maricultura tendrá un efecto profundo sobre la evolución y la supervivencia de los salmones y de las truchas mariscas. Si se gestiona bien, el efecto será beneficioso; si se gestiona mal (verbigracia: se instalen poblaciones inapropiadamente seleccionadas en un ecosistema costero en el que usurpen los hábitats de otras poblaciones valiosas), se perjudicará el ecosistema y saldrá dañada la producción racional de las pesquerías de salmónidos.

En Oregón, donde la maricultura de salmones plateados, chinuc y keta es legal bajo la estrecha supervisión del estado, una filial de la compañía Weyerhaeuser de productos forestales ha construido una gran piscifactoría cerca de Springfield. La descarga caldeada de una papelera calienta en invierno el agua helada del río McKenzie hasta una temperatura de 11 grados Celsius, lo que permite la incubación de huevos de coho y la cría de la freza. Cuando ésta alcanza el estadio de murgón, a finales de primavera, los peces se transportan en camión hasta Newport, en la costa, y se les instala en estanques que reciben agua de mar bombeada desde el océano. Después de pasar de 10 a 14 días en los estanques, los peces se han adaptado al agua océanica sin diluir. Después de un último pienso se sueltan al mar. Pasados unos 18 meses retornan al río artificial de agua salada que fluye desde los estanques de los que fueron liberados, presentándose en las mejores condiciones para su recolección. No se precisan botes ni redes. Los piscicultores ni siquiera necesitan reunir a los animales y apriscarlos en un redil: los peces van a los estanques por sí mismos.

En la naturaleza, el salmón rosado y el keta se hallan generalmente en las partes más septentrionales del área de distribución de los salmones. De ordinario frezan cerca del mar; algunas razas lo hacen incluso en llanuras de marea, donde el agua dulce se escurre hasta el mar. Después de la incubación en la grava durante los fríos meses del invierno, los pequeños alevines salen del nido en primavera y casi de inmediato se encaminan hacia el mar. A diferencia de los demás salmónidos, el salmón jorobado y el keta pueden adoptar la fase de murgón en cuanto se absorbe el saco vitelino.

La mayoría de estudiosos de la biología de los salmónidos creían que el salmón keta y, en particular, el rosado no podían vivir en agua dulce, sino que tenían que dirigirse al mar para sobrevivir. Por ello resultó sorprendente que una pequeña suelta de rosados en el lago Superior trajera la aparición de adultos tres años después. Este retorno en un año impar es desconocido en los salmones jorobados que van al mar, que normalmente retornan a los dos años. En los Grandes Lagos se desarrollará una pesquería para explotar esta nueva población.

En los años que siguieron a la segunda guerra mundial se pusieron en marcha en el norte de Japón y en la isla de Sajalín, Unión Soviética, grandes programas de piscifactorías para aumentar la producción de salmón rosado y keta. Casi todos los salmones de retorno se atrapan vivos en trampas o redes y no desde botes, como ocurre en la mayoría de pesquerías de salmón norteamericanas. Por ello, cuando se les envía al mercado, se encuentran sin marcas y en condición inmejorable.

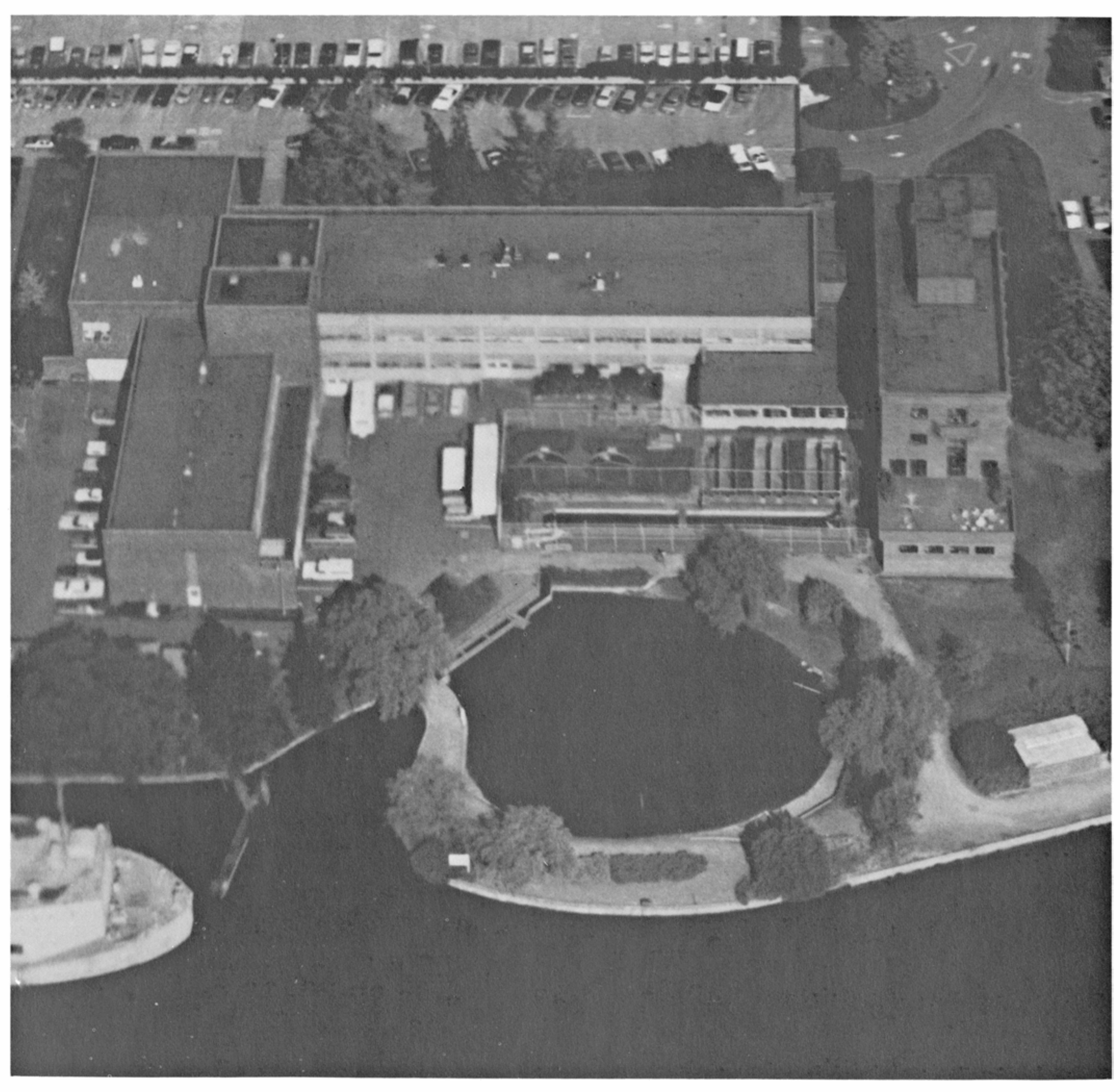
El programa japonés, muy bien coordinado, se ha ampliado hasta soltar más de cien mil millones de alevines de salmón perro cada primavera. Los jóvenes murgones abandonan las costas del Japón y se dirigen a zonas de alimentación oceánicas situadas al sur de las islas Aleutianas y en el golfo de Alaska. Tras permanecer de tres a cinco años en el océano, retornan a los ríos japoneses desde los que migraron al mar.

En otoño de 1982, el retorno capturado excedió de los 20 millones de salmones, en comparación con las capturas anuales de dos a tres millones de comienzos de siglo, cuando la pesquería se basaba en poblaciones que frezaban de modo natural.

Los rusos sueltan millones de alevines de salmón jorobado y keta de piscifactoría ubicadas en los pequeños ríos de Sajalín. Planean incrementar el número en unos 100 millones cada año hasta que el total alcance los 3000 millones en el año 2000. Al igual que los japoneses, los rusos promueven la captura final. Los peces en freza nadan corriente arriba a través de canales de recolección dispuestos junto a las orillas del río. Los pescadores, apostados en las márgenes, los recogen y depositan directamente en las líneas de procesado. La captura final es, con mucho, la manera más económica y eficaz de explotar este recurso. También permite los recuentos exactos y, con ello, favorece la gestión precisa y eficaz.

Considerada por algunos expertos una especie amenazada, comienza a vislumbrarse un futuro más prometedor para el salmón atlántico. La política seguida por Islandia ha conseguido mantener, e incluso aumentar, el número de salmones de retorno en sus ríos. Esta política se orienta a proteger el recurso y no a complacer a la industria de las pesquerías comerciales, como por desgracia hacen muchos gobiernos de Europa y Norteamérica.

El salmón que retorna a Islandia pertenece a los colonos que poseen la tierra situada a orillas de los ríos. Sin embargo, sólo en los tramos bajos de cuatro de los 250 ríos, y en tres localidades de la costa, se permite a los habitantes seguir la antigua práctica de pescarlos con red. Modalidad de pesca que se alza con el 40 por ciento de la captura



7. "RIO NATAL" de los salmones chinuc y coho criados artificialmente en la Universidad de Washington; es un estanque artificial ubicado en el recinto universitario. Para llegar a él, los 5000 o 6000 salmones que retornan al estanque desde el mar cada otoño tienen que efectuar varias rondas y pasar a través de un canal para la navegación. El agua que los atrae se bombea desde el canal hasta el estanque y fluye de nuevo al canal por gravedad.

anual. El resto lo capturan pescadores deportivos que utilizan caña y sedal. Tanto los derechos de pesca comercial como los deportivos deben arrendarse a los dueños de la tierra. La gestión de las pesquerías de salmón está estrictamente controlada por el gobierno, que vela para que un número elevado de peces lleguen a las zonas de desove.

El programa tiene una segunda parte: la cría artificial y la apertura de ríos que antaño los salmones no podían remontar. En la piscifactoría experimental de Köllafjördur, gestionada por el gobierno, se han logrado grandes avances en el uso de agua caldeada geotérmicamente para la cría acelerada de murgones de salmón atlántico, en el control del fotoperíodo al que se expone cada día a la freza para promover la alimentación y el crecimiento, en el desarrollo de poblaciones reproductoras para la colonización de ríos abiertos recientemente a los salmones y en la mezcla de agua dulce y salada en los estanques de cría para estimular el proceso de transformación en murgón. Ríos que antes resultaban insuperables para los salmones se han abierto mediante la construcción de dispositivos de paso de los peces. El gobierno promueve y subvenciona asimismo el desarrollo de la cría comercial.

En Europa occidental, los cardúmenes de salmón se han reducido notablemente en comparación con el nivel que alcanzaban en la época preindustrial, no sólo por el deterioro involuntario de los hábitats, sino también por la interceptación en el mar, donde las redes de deriva de un país capturan salmones que se originaron en otro país. En Escocia, Irlanda, Noruega y Canadá los empresarios están tomando medidas para asegurar el suministro de salmón atlántico a sus mercados mediante la cría de los peces, hasta la madurez, en estanques marinos y jaulas flotantes. Noruega, con su larga línea de costa de fiordos protegidos, va por delante en este nuevo tipo de maricultura. En



8. PISCICULTIVO de salmón atlántico y de trucha arco iris, realizado por empresarios noruegos en jaulas flotantes del tipo que aquí se ilustra. En 1981, Noruega comercializó más de 8000 toneladas de salmón común o atlántico (*Salmo salar*) cultivado. Se espera que la producción se triplique en 1986.

1981, distribuyó 8000 toneladas de salmón atlántico de criadero; se espera que la producción se triplique en los tres próximos años.

De todos los salmónidos, la trucha arco iris o irisada exhibe la mayor diversidad genética. Desde su área original de distribución, a lo largo del margen del Pacífico oriental, las truchas arco iris se han extendido, o se las ha llevado, a casi todas las zonas del globo. Medran incluso en los trópicos, en puntos muy elevados.

Además de alimentar valiosas pesquerías deportivas, las truchas arco iris constituyen la materia prima de grandes empresas comerciales. Sólo Italia produce 21.000 toneladas anuales de trucha arco iris para su comercialización. Dinamarca, Finlandia, Francia, Noruega y el Reino Unido poseen grandes instalaciones. En el sur de Idaho, en el valle del río Snake, las granjas de trucha rinden unas 13.000 toneladas anuales de trucha arco iris.

En estado salvaje la trucha arco iris freza únicamente en primavera. Se dispone ya de poblaciones criadas selectivamente que frezan casi cada mes, lo que constituye una base inmejorable para la piscicultura comercial de la trucha.

En la Facultad de Oceanografía y pesca de la Universidad de Washington, funciona desde 1932 un programa de cría selectiva de trucha arco iris. Tiene por objetivo producir gran número de peces sanos y aclimatados para los programas de gestión lacustres y fluviales y para las piscifactorías comerciales. En los primeros años, las truchas alcanzaban la madurez en su cuarto año, cuando pesaban por término medio 680 gramos. Las hembras producían de 400 a 500 huevos en la primera freza. Algunos machos de nuestra población seleccionada alcanzan ahora los 680 gramos en su primer año. Las hembras, que maduran en su segundo año con un peso medio de 4500 gramos, producen alrededor de 10.000 huevos cada una. Aunque la tasa de aumento de la longitud media de los peces seleccionados como población de cría ha disminuido, el peso medio de los peces continúa aumentando. Se obtienen así peces de cuerpo más alto, con mejor carne. Nos gusta comparar nuestros resultados con la obtención de pavos pechugones por nuestros colegas avicultores.

La estirpe de truchas arco iris de la universidad ha estado separada del mar durante muchas generaciones. Sin embargo, y para nuestra sorpresa, murgones procedentes de huevos de esta estirpe se adaptaron bien cuando se introdujeron, en jaulas flotantes, en mar noruego. Alcanzaron un tamaño considerable (de 2250 a 6750 gramos) en lo que suponíamos un ambiente relativamente inhóspito.

La cría de trucha arco iris en jaulas desplegadas en el mar se ha convertido, en Noruega, en un próspero negocio. En 1981 se distribuyeron a los distintos mercados, la mayoría de ellos europeos, unas 4000 toneladas. El mercado se está extendiendo a los Estados Unidos. En Seattle, la capital salmonera del mundo, están apareciendo truchas irisadas grandes y frescas criadas en estanques de Noruega.

El entrecruzamiento de poblaciones o razas estrechamente emparentadas de plantas y animales suele producir el llamado "vigor híbrido". En los salmónidos también se aprecia esta tendencia. Cruzamientos interraciales entre truchas mariscas (*steelheads*), es decir, truchas arco iris anádromas, y las truchas arco iris no migradoras seleccionadas, desarrolladas en la Universidad de Washington, producen híbridos que crecen más rápidamente que las *steelheads* pero más lentamente que las truchas arco iris no migradoras. Parece que el factor de crecimiento dominante en la población de la universidad se ha transmitido, al menos en parte, a las *steelheads*. Además, los híbridos parecen retener la característica de éstas de migrar al mar, donde crecen rápidamente. Cuando, a su madurez, retornan, proporcionan un excitante deporte a los pescadores de recreo, pues tienen la costumbre, propia de la trucha arco iris, de morder el cebo.

La cría selectiva de salmónidos puede, en un tiempo relativamente breve, afectar su forma, tamaño, comportamiento, sabor y valor alimentario con la profundidad que 1500 años de cría selectiva han afectado a la producción de ganado lechero y vacuno. La evolución futura de las especies de salmónidos se encuentra, sobre todo, en manos de las personas que están empezando a criarlas a gran escala. La tarea plantea retos. Uno de ellos: mantener la diversidad genética disponiendo santuarios apropiados que aseguren la supervivencia de poblaciones salvajes; otro, utilizar la enorme adaptabilidad de estos notables animales criando selectivamente poblaciones que puedan instalarse a la vez en nuevos ambientes y en lugares donde las poblaciones nativas se han visto desplazadas por la acción del hombre.

Ciencia y sociedad

Lagunas en los hielos

Pocos lugares de la superficie terrestre reúnen las sutiles y complejas interacciones que tanto gustan a los geólogos como aquellos en que coinciden el hielo, el aire y el agua. Y en ellos, nada ejemplifica mejor esa complejidad que las poliñas, zonas que, en medio de un mar helado, se mantienen, sorprendentemente, libres de hielo. El término designa, en ruso, los espacios abiertos en el hielo.

Dos grupos de investigadores escriben sobre poliñas en un número monográfico del *Journal of Geophysical Research* dedicado a "zonas marginales de hielo". J. D. Schumacher y C. H. Pease, de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos en Seattle, y K. Aagaard y R. B. Tripp, de la Universidad de Washington, investigaron la poliña del mar de Bering, frente a la costa meridional de la isla de San Lorenzo. Coinciden allí una corriente que avanza hacia el norte, hacia el océano Artico, y vientos de componente norte. La formación de hielo es continua, pero el viento se lo lleva. En distintos puntos próximos a la poliña, los científicos midieron las corrientes, temperatura y salinidad oceánicas, así como la velocidad del viento, desde noviembre de 1980 hasta junio de 1981. Alrededor de dos tercios de las fluctuaciones significativas de las corrientes que se detectaron ese invierno podían achacarse a la variabilidad a gran escala de la circulación oceánica o a la acción del viento. En 11 casos, sin embargo, se produjo un hecho más complejo. Se invirtió la corriente oceánica y descendió la temperatura del agua, situándose casi a la temperatura de congelación del mar saturado de sal. Obviamente, la expulsión de sal del agua oceánica congelada aumentaba la densidad del mar subyacente, produciendo "un gradiente de presión mar adentro que, en conjunción con la fuerza del viento hacia el mar, invirtió el flujo general".

El otro grupo, integrado por D. R. Topham y R. G. Perkin, del Instituto de Ciencias Oceanográficas de Columbia Británica, S. D. Smith y R. J. Anderson, del Instituto Bedford de Oceanografía de Nueva Escocia, y G. den Hartog, del Servicio Ambiental Atmosférico de Ontario (instituciones canadienses las tres), estudiaron la poliña de la bahía de Baffin, situada entre las islas de Devon y Dundas. El área se caracteriza por sus fuertes mareas y corrientes; además, la porción más estrecha del canal Pioneer, que separa las dos islas, resultó estar dividida por "una cresta somera a una profundidad aproximada de 40 metros". Los autores midieron las corrientes, temperatura y salinidad del océano en marzo y abril de 1980. La temperatura variaba con las mareas hasta 0,2 grados Celsius, lo que generaba "pulsos" de agua oceánica. Los pulsos más fríos se "aproximaban al punto de congelación local. Probablemente se generaran en las regiones someras próximas a la costa". Los pulsos calientes alcanzaban la superficie en la margen meridional del canal. Parecían derivar de "fuertes flujos de marea a través [de la] cresta somera". Su temperatura, ligeramente superior, bastaba para provocar la poliña.

Dictágrafo

El desarrollo de una máquina que transcriba automáticamente el habla humana aparece laborioso y fragmentario; el obstáculo fundamental lo constituye la pronunciación, que varía enormemente de una persona a otra, y aún en una misma persona, según sea el contexto lingüístico de un determinado fonema, estado de ánimo de quien habla, calidad del micrófono empleado, etcétera [véase "Reconocimiento del habla por medio de ordenadores", por Stephen E. Levinson y Mark Y. Liberman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1981]. Varios laboratorios están abordando el problema desde una perspectiva general: ¿hasta qué punto puede construirse una máquina que reconozca el lenguaje hablado por la gente? Un objetivo mucho menos ambicioso sería el desarrollo de una máquina de escribir accionada por la voz. Raymond Kurzweil, especialista en informática que trabajó en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, acaba de crear una compañía que se ha empeñado en sacar, de aquí a 1985, una máquina de escribir capaz de transcribir un vocabulario de 10.000 palabras. La Kurzweil Speech Systems, Inc., que así se llama la empresa, se beneficiará de una importante inversión a cargo de la firma Xerox.

En cualquier máquina de reconocimiento del habla que salga al mercado en los próximos diez años convergerán tres considerandos: el coste, la capacidad técnica y la aceptación del comprador; de momento, resulta técnicamente inviable transcribir un lenguaje rápido y fluido con un vocabulario amplio. El proyecto de Kurzweil supone la construcción de un aparato de unos 5000 dólares que responda a un dictado simple, en el que la pronunciación respete una breve pausa entre palabras. El dispositivo podría tomar al dictado unas 150 palabras por minuto. Habría que acomodarlo a las características tonales del usuario antes de que estuviera en condiciones de funcionar. El modelo empleado para reconocer el habla se iría perfeccionando progresivamente hasta alcanzar el reconocimiento de las 10.000 palabras de uso más frecuente por parte del que fuera a utilizarla. El sistema de reconocimiento está diseñado para que sea compatible con muchos de los ordenadores de gestión personal existentes.

Otras compañías están desarrollando también sistemas de reconocimiento del habla para aplicaciones específicas; ninguna, empero, ha entrado en la carrera por la consecución de una máquina de escribir accionada por la voz. Threshold Technology, Inc., que se declaró en quiebra el año pasado, sigue fabricando máquinas que reconocen la voz diseñadas especialmente para ambientes industriales ruidosos. Sus ingenios reconocen hasta 340 palabras, pronunciadas con una breve pausa entre ellas, a una cadencia de hasta 180 por minuto. La empresa pretende anunciar pronto un dispositivo capaz de reconocer 1500 palabras pronunicadas aisladamente; reconocerá discursos seguidos de cualquier longitud con un vocabulario de unos 50 términos.

Uno de los dispositivos más complejos para reconocer términos en inglés lo fabrica la japonesa NEC, y ya está en el mercado. Debe ajustarse la máquina a su usuario, pero reconoce discursos de hasta cuatro segundos de duración con un vocabulario de 150 palabras. En ese país se fabrican también ingenios adaptados específicamente al japonés; sus prestaciones no pueden compararse directamente con las máquinas que reconocen lenguas occidentales, puesto que en japonés sólo exis-

ten 120 sílabas, mientras que en inglés, por ejemplo, hay unas 10.000. Además, los japoneses pronuncian de un modo más uniforme, sin altibajos entre sílabas. (También urge más la máquina de escribir que reconozca el japonés que cualquier lengua occidental, pues los mecanógrafos japoneses tienen ante sí teclados con más de 3200 caracteres.)

En los laboratorios Bell se está dando remate a varios artefactos capaces de reconocer la voz, que tienen prevista la entrada en el mercado a finales de año. Se sabe que la compañía diseña sistemas versátiles, que responden a muchos usuarios, y otros que requieren un entrenamiento personal. Los sistemas no limitados a un operador permitirían controlar un banco de datos de ordenador, emitir órdenes o responder por teléfono a una serie de preguntas programadas. El inconveniente es que el vocabulario sería en esos casos más limitado que en las máquinas de un solo usuario.

La International Business Machines Corporation (IBM) lleva entre manos el desarrollo de un sistema de dictado de oficina que reconozca discursos con un vocabulario de hasta 5000 palabras. Según Frederick Jelinek, quien dirige el Centro de Investigación Thomas J. Watson de la IBM, se pretende conseguir una máquina que requiera un entrenamiento de menos de 15 minutos para reconocer el habla de un individuo. El enfoque empleado para el ajuste de modelos es estadístico: se muestrea cada 10 milisegundos el espectro del suceso sonoro y se asigna cada muestra al patrón espectral más similar de los 200 que lleva almacenados digitalmente un ordenador. Las palabras se reconocen por el término que se ajuste mejor a una secuencia determinada de patrones espectrales, y que tenga, además, una elevada probabilidad de ir a continuación de otros dos anteriores; las probabilidades asociadas a secuencias de tres palabras se han obtenido de un exhaustivo análisis de correspondencia comercial. Jelinek puntualiza que IBM no está desarrollando ninguna máquina de reconocimiento del habla para uso comercial, pero que la compañía sí está en la liza en pos de una máquina de escribir accionada por la voz.

Hay razones para tomar en serio el reto de Kurzweil, pese a los objetivos de otras compañías. En 1975 construyó el primer modelo funcional de máquina que reconocía la letra impresa en más de 200 tipos y que pronunciaba el texto leído. La aplicación más importante del ingenio ha sido, hasta ahora, su empleo como máquina de lectura por los invidentes. Se sitúa un libro, periódico o cualquier otro texto impreso sobre una ventana de vidrio y la máquina pronuncia automáticamente el escrito con voz sintetizada. Puede acelerarse la lectura hasta 225 palabras por minuto, así como hacer repetir una frase, deletrear palabras o saltarse párrafos. La Kurzweil Computer Products, Inc., suministra la máquina de lectura principalmente a bibliotecas y otras instituciones por unos 30.000 dólares. Aunque el reconocimiento óptico de caracteres y el reconocimiento de sonidos vocales requieren técnicas bastante distintas, los problemas subyacentes son los mismos: hay que comparar, en poco tiempo, un enorme número de patrones con un número limitado de modelos internos.

Dietas dudosas

Mantienen los médicos que la salud mejoraría notablemente sólo con que la gente cambiara algunos hábitos, en vez de desarrollar nuevos tipos de intervenciones médicas. El problema es de información: ¿qué conductas modificar y cómo? Salvo para el consumo de tabaco, los consejos de los expertos en salud pública no son muy explícitos. La prevención y, en su caso, corrección de la hipertensión vale de ejemplo. Entre 35 y 60 millones de estadounidenses (según de dónde proceda la estimación) padecen hipertensión "constitutiva", es decir, sin causa determinada en un 95 por ciento de los casos. Desde hace años se vienen estableciendo correlaciones entre la presión sanguínea y factores dietéticos: exceso de calorías en la ingesta (obesidad), déficit de magnesio, etcétera. Se apunta, en algunos casos, la existencia de relaciones causa-efecto, de lo que se deduciría que una atención a la dieta podría resultar profiláctica o terapéutica.

Un suplemento de *Annals of Internal Medicine* recoge 35 trabajos donde se revisan y evalúan esos hallazgos. Las conclusiones siguen siendo poco categóricas. Así lo expresa Harriet P. Dustan, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Alabama, en el editorial de ese número. "Nos hayamos aún lejos de identificar un factor dietético que sea importante en la patogénesis de la hipertensión." No obstante, la idea de modificar la dieta es atractiva. Los estudios epidemiológicos muestran diferencias en el régimen alimentario de poblaciones que revelan distinta incidencia en la hipertensión.

Otra razón de interés del enfoque dietético es el desencanto de algunos médicos ante una terapia farmacológica agresiva frente a la hipertensión leve. En los últimos 10 años, a medida que se ha dispuesto de nuevos agentes contra la hipertensión, se ha convertido casi en axioma que cualquier grado de hipertensión debería someterse a tratamiento. Lo que significa que la mayoría de los médicos habían de recetar fármacos a pacientes con una presión diastólica de 90 o más. Norman M. Kaplan, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Texas en Dallas, argumenta, frente a esa práctica, que los resultados obtenidos no avalan la terapia farmacológica para la hipertensión leve (de 90 a 104) y que cualquier tratamiento por drogas comporta ciertos riesgos. Las terapias sin fármacos, entre ellas la modificación de la dieta, están indicadas en esos casos, señala.

Pero, ¿qué cambios? No hay acuerdo entre los médicos. Considérese la reducción de la ingesta de sal (cloruro sódico), probablemente la recomendación más frecuente. James C. Hunt, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Tennessee, sostiene que "el exceso de consumo de sodio por la población norteamericana es motivo justificado de preocupación". Aceptando que la hipertensión se relaciona con la ingestión de sodio en algunas personas más que en otras, cita estudios culturales comparados que demuestran que las sociedades donde el consumo de sodio es elevado padecen una frecuencia mayor de hipertensión y fallos cardíacos, una de sus consecuencias más importantes. Por el contrario, muchos estudios no han logrado demostrar la existencia de correlación, dentro de una misma sociedad, entre una alta ingesta de sodio y la hipertensión, lo que ha llevado a otros investigadores a dudar del valor de la limitación de sodio a la población general. Dustan señala que no se ha probado la necesidad de rebajar el nivel de sal. Sí parece que hay acuerdo en que, puesto que la reducción de la ingesta de sodio puede impedir la aparición de hipertensión en algunas personas y que la dieta salada resulta casi con seguridad poco beneficiosa, no sería mala idea disminuir su uso en los alimentos.

ERRATUM

En la página 46, segunda columna, del número 83, correspondiente al mes de agosto de 1983, donde dice carbohidratos debe decir hidrocarburos.

El aprendizaje de un caracol marino

El caracol Hermissenda *puede condicionarse, esto es, ser entrenado para que asocie dos estímulos. Se han descrito en él los mecanismos responsables de dicho aprendizaje; quizá no difieran mucho de los del cerebro humano*

Daniel L. Alkon

¿Pueden explicarse las complejas funciones mentales de los animales superiores a través de la actividad eléctrica de ciertas células nerviosas y de los fenómenos químicos que generan dicha actividad? Los neurobiólogos describen ya algunos comportamientos simples y estereotipados en un nivel exclusivamente físico. Así, el reflejo de encoger la extremidad en respuesta a un estímulo dañino puede entenderse en función de los impulsos eléctricos de unos cuantos tipos de células; se conocen bastante bien los mecanismos electrofisiológicos y bioquímicos en que se basan las descargas de esos estímulos. Sin embargo, existe un inmenso abismo entre una acción refleja y, por ejemplo, la memoria y el aprendizaje humanos. Cabe, no obstante, la posibilidad de empezar a acortar esas distancias abismales mediante el análisis de formas simples de aprendizaje en animales con sistemas nerviosos sencillos.

Palomos, perros y humanos son susceptibles de condicionamiento: aptos para ser instruidos a que asocien un estímulo con otro con el que guarda una relación de temporalidad. El perro aprende, y recuerda, que el sonido de una campana precede y presagia el olor de carne, de forma que segrega saliva tras el tañido. El cerebro de los vertebrados es demasiado complejo para permitir un análisis de tal aprendizaje asociativo en el nivel celular con los medios técnicos actuales. Sin embargo, durante varias décadas, los neurobiólogos han estudiado, en animales invertebrados, pequeñas redes de células nerviosas responsables de la integración de la información sensorial. En los últimos 20 años se han investigado los circuitos nerviosos en los que se basan comportamientos reflejos simples. Hace unos 12 años, mis colegas del Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole, Massachusetts, y yo mismo, nos preguntábamos si tales animales, con un número de neuronas (células nerviosas) varios órdenes de magnitud inferior al billón de células que tiene aproximadamente el cerebro humano, serían susceptibles de condicionamiento. Si lográramos que un invertebrado asociara dos estímulos, podríamos intentar la identificación de las vías nerviosas activadas por esos estímulos, y su convergencia, lo que proporcionaría el substrato físico del aprendizaje asociativo. Mediante el estudio de la actividad de los circuitos de neuronas trataríamos de identificar los cambios específicos producidos por el condicionamiento, y, de esta forma, nos aventuraríamos a describir el "aprendizaje" en términos eléctricos y moleculares.

Entrenamiento

Escogimos como material de experimentación un molusco gasterópodo, el caracol marino *Hermissenda crassicornis*, que carece de concha. *Hermissenda*, en su medio ambiente natural, muestra fototaxia positiva durante la fase luminosa del ciclo luz-oscuridad, es decir, se desplaza hacia la luz. Tal comportamiento tiene un claro valor adaptativo: los Hidroideos, los microorganismos que constituyen el alimento del caracol marino, se concentran en aguas superficiales y bien iluminadas. Cuando el mar se vuelve turbulento, como ocurre durante una tormenta, *Hermissenda* responde disminuyendo su velocidad global de movimiento y aumentando la superficie de su "pie" muscular. Estas respuestas le permiten adherirse a superficies duras de aguas más profundas. Nuevamente, el valor asociado con la supervivencia de estas respuestas es obvio. Cuando un animal se acerca a la superficie durante una tormenta se ve sometido a violentas agitaciones. Aunque resiste varias semanas sin alimento, morirá si los golpes del mar embravecido dañan su estructura.

Quizás la experiencia de hallar la turbulencia asociada siempre a la luz de la superficie "enseñe" al caracol a relacionar la luz con el oleaje. La luz sería el presagio del inicio de la turbulencia, y el aprendizaje de tal asociación tendería a retardar los movimientos del animal hacia el lugar de máxima luz, que sería también el área de máxima turbulencia. Valía la pena reproducir en el laboratorio los efectos de la luz y la turbulencia.

Entrenamos a los caracoles en tubos de vidrio llenos con una solución equivalente al agua marina y dispuestos radialmente sobre un soporte giratorio. Primero medíamos el tiempo promedio que empleaban los individuos sin entrenar para desplazarse hasta un área iluminada del centro del soporte giratorio. Girábamos luego el soporte a diferentes velocidades, sometiendo a los animales a una fuerza centrífuga que simulaba los efectos de la turbulencia. Se ensayó una gran variedad de condiciones; en algunos individuos se hacía coincidir repetidamente, con minuciosa exactitud, la luz y la rotación; de los cinco grupos de control unos no fueron sometidos ni a luz ni a rotación, otros a un solo estímulo y otros, en fin, a distintas combinaciones y asociaciones temporales de ambos estímulos.

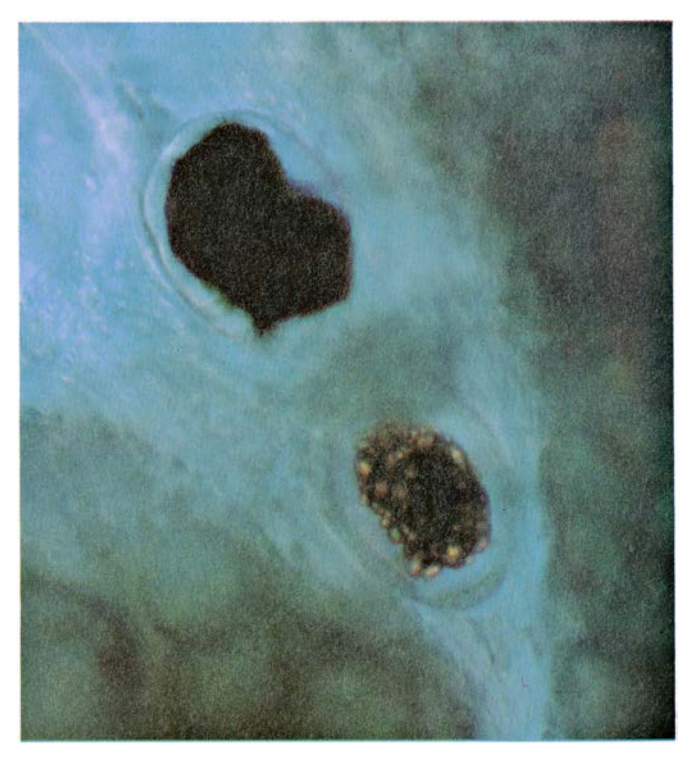
Después del entrenamiento volvíamos a cronometrar el desplazamiento de los animales hacia la luz y calculábamos el efecto del entrenamiento. En los animales sometidos simultáneamente a



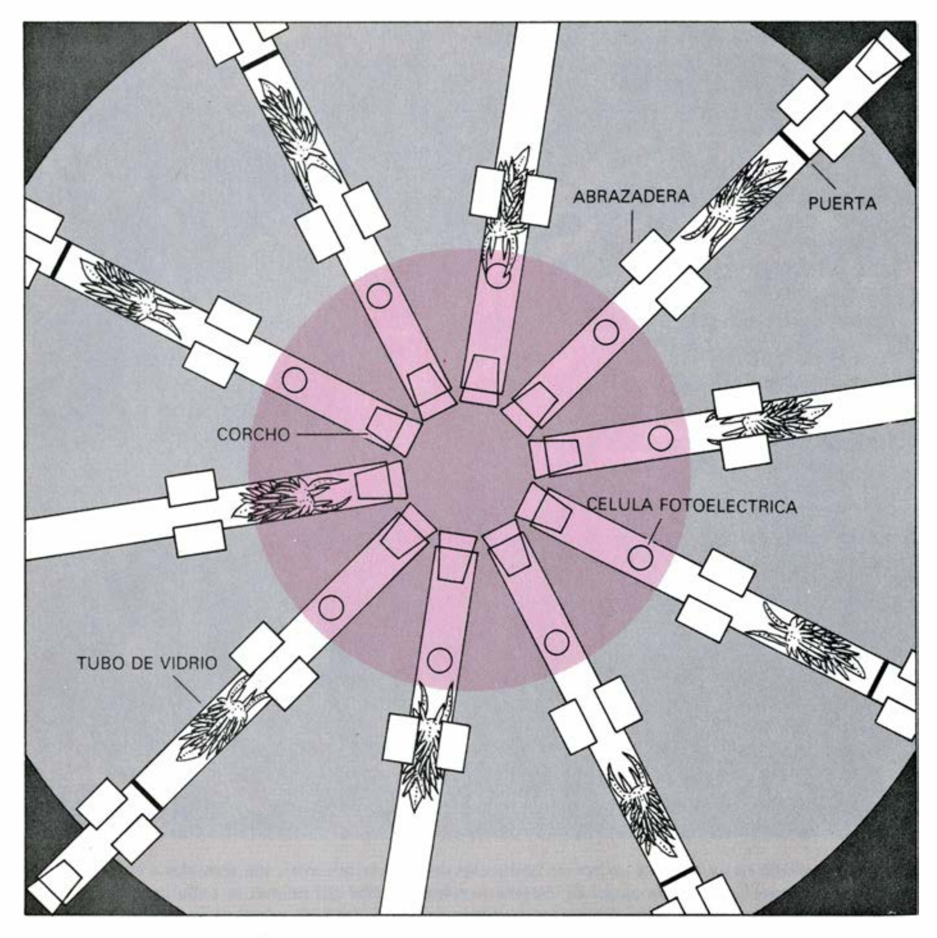
1. ***HERMISSENDA CRASSICORNIS*, un caracol marino, fotografiado en un acuario de agua salada por Pierre A. Henkart, del Instituto Nacional del Cáncer de los Estados Unidos. Mide casi cuatro centímetros de longitud. Los dos grandes tentáculos orales son órganos táctiles y quimiosensoriales; se supone que los breves tentáculos dorsales (rinóforos), son sensibles a los movimientos de agua. El sistema nervioso central del animal se halla en la cresta bucal, justo detrás de los rinóforos. Los cerata, o apéndices en forma de pluma que cubren el dorso, le sirven, seguramente, de órganos de intercambio gaseoso.**



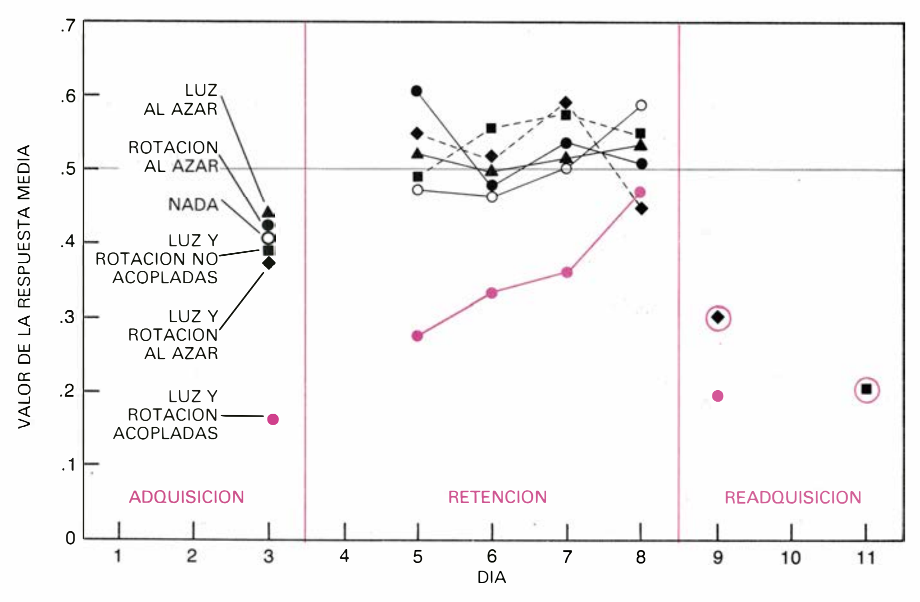
2. SISTEMA NERVIOSO CENTRAL de *Hermissenda*, aumentado unas 50 veces en esta microfotografía realizada por Alan M. Kuzirian, del laboratorio del autor. El colorante azul de metileno resalta los ganglios globulares, o masas de células nerviosas relacionadas, y numerosos nervios que irradian sobre la cresta bucal. Los ojos (*negro*) y los primitivos órganos vestibulares, denominados estatocistos (*puntos blancos*) se localizan entre los dos ganglios pedios (*abajo, izquierda y derecha*) y el ganglio pleural, situado más hacia el centro.



3. OJO Y ESTATOCISTO, aumentados unas 300 veces en esta micrografía tomada por Kuzirian. Las membranas sensibles a la luz de cinco fotorreceptores se extienden a lo largo del pigmento negro para acabar en el lado inferior de las lentes. La pared del estatocisto, ligeramente esférica, consta de 13 células pilosas. Sus cilios móviles (no visibles aquí) encierran una masa de cristales (estatoconias), que quedan en el centro; los cambios de orientación de la fuerza de gravedad mueven los cristales, excitando ciertas células pilosas.



4. PARA ENTRENARLOS Y SOMETERLOS A PRUEBA se colocan los caracoles en tubos de vidrio apoyados en un soporte giratorio. Antes del entrenamiento se mide la respuesta fototáctica de cada caracol en respuesta a la luz: el tiempo que el caracol tarda en alcanzar una zona con luz (*color*) se registra automáticamente cuando el animal llega a la célula fotoeléctrica. Se les somete a rotación mientras se les mantiene confinados en el extremo exterior del tubo; así, se ven sometidos a una fuerza centrífuga a la que son sensibles sus estatocistos. En un grupo, la rotación se empareja exactamente con un período de luz de 30 segundos. Otros grupos, que sirven de control, se entrenan o se les somete exclusivamente a luz o rotación o a los dos estímulos aplicados alternativamente o al azar. En la fase postrema, se cronometra la velocidad de movimiento del caracol hacia la luz para determinar el efecto del entrenamiento.



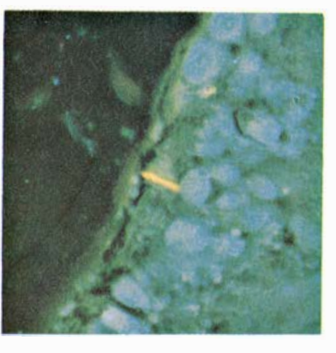
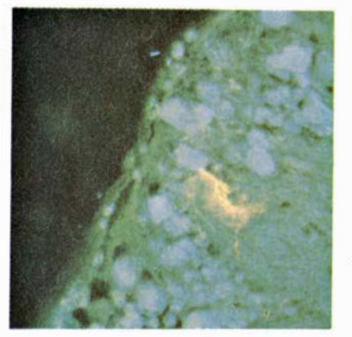
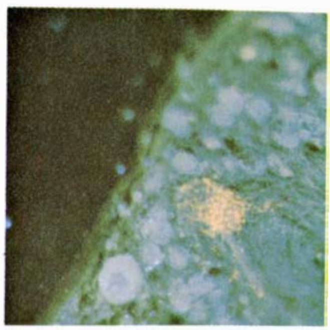
5. DATOS QUE DEMUESTRAN EL CONDICIONAMIENTO. El "valor de la respuesta" mide la supresión de la respuesta fototáctica. Un valor de 0,5 significa que no ha habido cambio en la velocidad de movimiento hacia la luz; un valor menor implica una reducción de la velocidad. Los animales sujetos a luz y rotación simultáneamente (*puntos de color*) se condicionaron a los tres días de entrenamiento: avanzaban más lentamente. Tardaron en "olvidar" el comportamiento, pero lo readquirieron con un solo día de nuevo entrenamiento. Los animales control no mostraron cambios importantes de conducta (*negro*), aunque mostraron condicionamiento cuando se les sometió a estímulos acoplados (*circunferencias de color*).

luz y rotación (y solamente en ellos) la velocidad de movimiento hacia la luz descendía por debajo de un tercio de la velocidad anterior al entrenamiento. Habían aprendido a asociar la luz (que en ese caso era el estímulo condicionado) con la rotación (estímulo incondicionado). El condicionamiento había producido una respuesta a la luz parecida a la respuesta a la rotación.

Condicionamiento

Los diferentes procedimientos de control indicaron que los cambios en el comportamiento evocado por la luz después del entrenamiento reflejaban un auténtico aprendizaje asociativo. La exposición exclusiva a la luz no cambió la subsiguiente respuesta a la misma, descartándose un cambio de comportamiento no asociativo denominado habituación, que es la progresiva debilitación de la respuesta ante la presentación reiterada de un estímulo. La exposición exclusiva a la rotación no alteró la respuesta posterior a la rotación, desechándose la posibilidad de la sensibilización, es decir, el reforzamiento de la respuesta resultante de una presentación repetida de un estímulo con una fuerte motivación. (Tanto la habituación como la sensibilización pueden hacer creer que haya ocurrido un cambio en el comportamiento asociativo. Tales efectos no se han descartado por completo en el caso de ciertos cambios conductuales que siguen al entrenamiento asociativo en otras especies de caracoles.) Además, *Hermissenda* no presentaba condicionamiento al alternarse los estímulos lumínicos y rotatorios, o cuando éstos se presentaban al azar. Con Terry J. Crow demostramos que los dos estímulos debían presentarse juntos. (En concreto, el comienzo de la luz debía preceder al de máxima rotación en un segundo, aproximadamente.) Fue la relación temporal constante entre los estímulos lo que el animal aprendió y recordó.

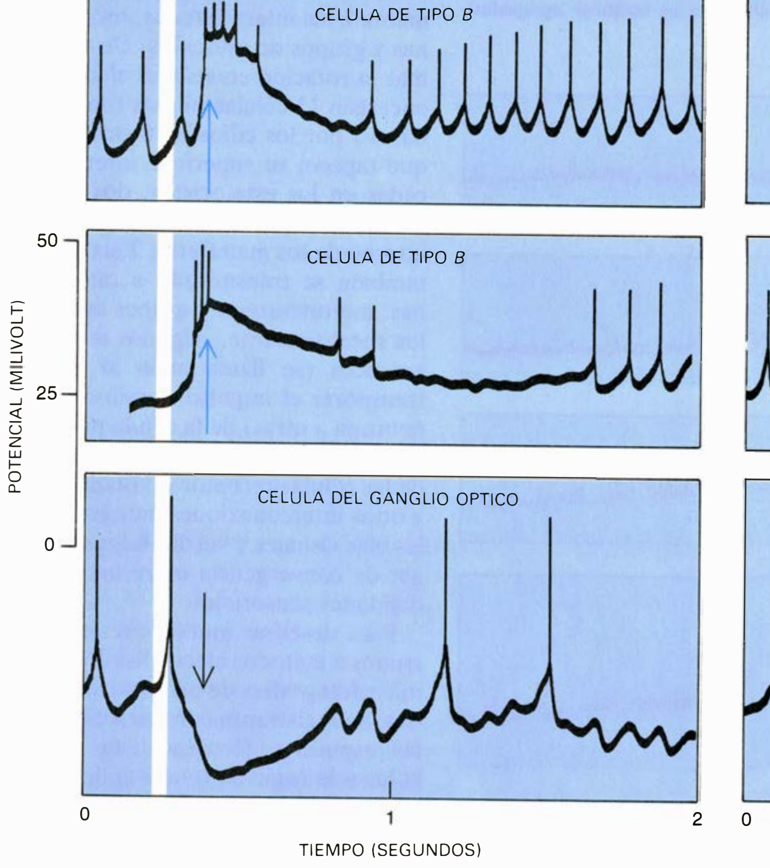
El cambio de comportamiento presentaba también otras características del condicionamiento clásico, como la "adquisición" (incremento de la cuantía del cambio obtenido con la práctica); persistía varias semanas (lo que en este caracol supone casi una generación) y no afectaba a las respuestas del animal frente a estímulos diferentes de los dos utilizados. William Richards y Joseph Farley, de la Universidad de Princeton, demostraron que el aprendizaje tenía una persistencia efímera, se extinguía: una vez finalizado el entre-

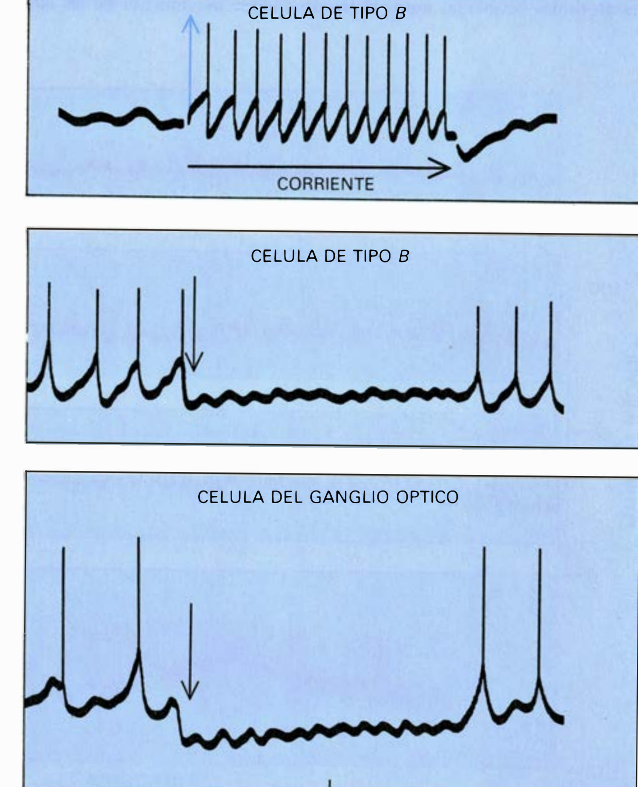





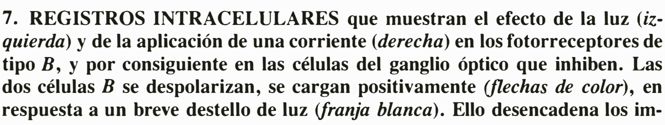
6. **FOTORRECEPTOR DE TIPO *B* localizado en estas microfotografías de Leona Masukawa. Se inyectó en una célula de tipo *B* el colorante amarillo Procion, que recorrió el axón hasta alcanzar los terminales axónicos. En la primera microfotografía el colorante ocupa el cuerpo celular (cerca de la lente blanca) y el inicio del axón. En las finas secciones consecutivas de tejido se aprecia cómo el axón (seccionado oblicuamente) penetra en el ganglio pleural y, en la última microfotografía, acaba en un conjunto de finas ramas. Los terminales de las ramas forman sinapsis (uniones) con otras células.**

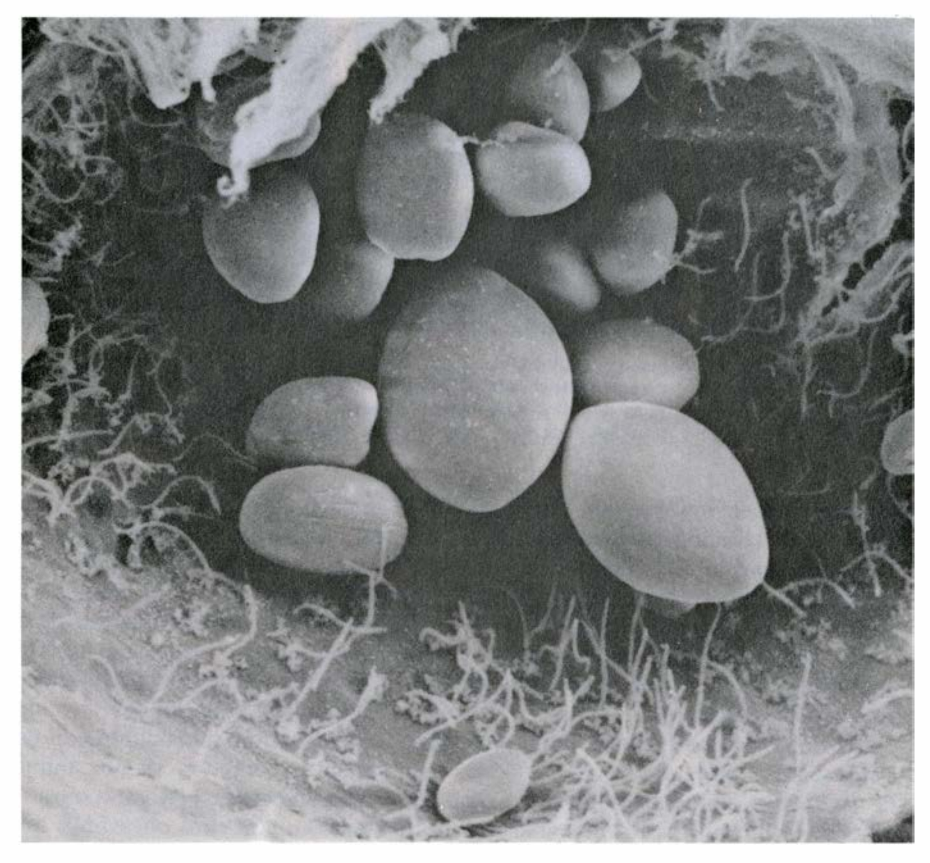
namiento, los animales "olvidaban" la asociación aprendida, y lo hacían con tanta mayor rapidez cuanto más a menudo se presentara la luz sin rotación. Crow demostró, además, que, tras la extinción, los animales volvían a retener la asociación en un número de ensayos inferior a los ejecutados la primera vez; este aprendizaje acelerado se denomina ahorro. Farley dedujo, finalmente, que *Hermissenda* tardaba más en aprender cuando durante el condicionamiento se interponían estímulos adicionales aislados (luz o rotación). Esta degradación del aprendizaje por estímulos no asociados presentaba dependencia (los animales aprendían que la rotación se daba con la luz, y cuando esto no era así el proceso de aprendizaje se deterioraba).

Los cambios conductuales aquí descritos se obsevaron en caracoles traídos de su medio ambiente natural, en la costa de California. Mostraban una amplia gama de respuestas a la luz antes del entrenamiento, lo que probablemente reflejara diferencias individuales en experiencia y genotipo. June F. Harrigan desarrolló por ello una estirpe de *Hermissenda* cuyas respuestas anteriores al entrenamiento eran más uniformes, al igual que los cambios de comportamiento observados durante el entrenamiento. También criamos animales con un defecto en el órgano sensible a la rotación; con ellos obtuvimos mu-

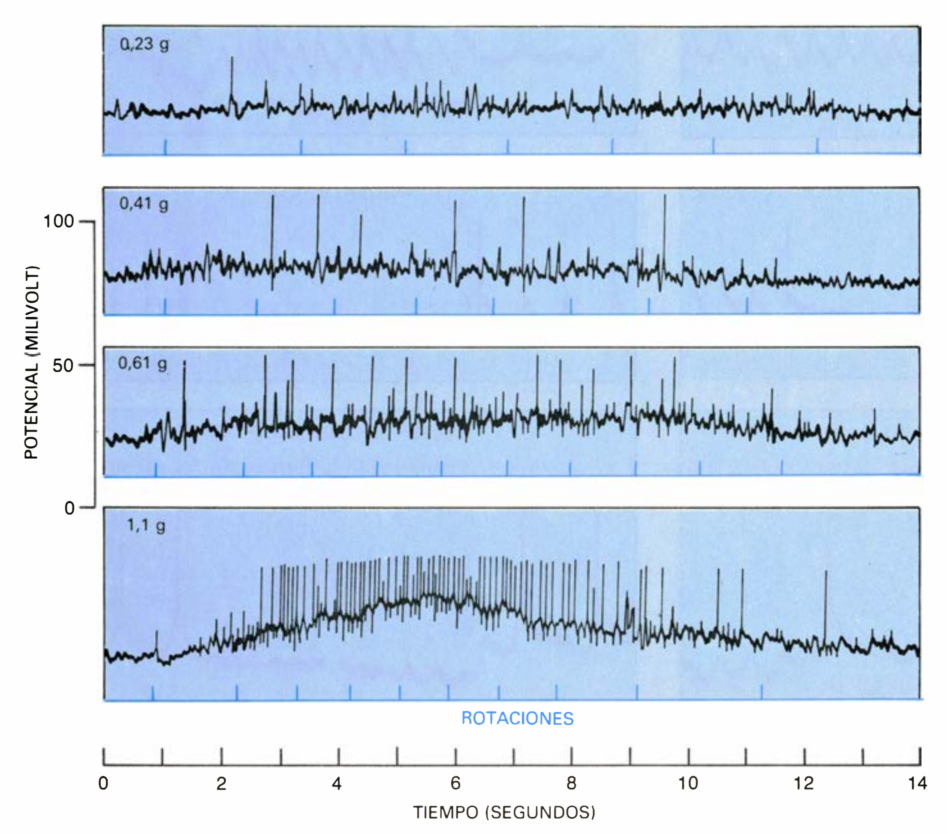





7. **REGISTROS INTRACELULARES que muestran el efecto de la luz (*izquierda*) y de la aplicación de una corriente (*derecha*) en los fotorreceptores de tipo *B*, y por consiguiente en las células del ganglio óptico que inhiben. Las dos células *B* se despolarizan, se cargan positivamente (*flechas de color*), en respuesta a un breve destello de luz (*franja blanca*). Ello desencadena los impulsos nerviosos. Estas señales generan potenciales postsinápticos inhibidores en la célula del ganglio óptico, induciendo su carga negativa (*flechas negras*), con lo que se liberan menos impulsos. La aplicación de una corriente positiva (*flecha horizontal*) en una cualquiera de las células *B* simula el efecto de la luz, generando impulsos que inhiben la otra célula *B* y la del ganglio óptico.**



8. HEMISFERA DEL ESTATOCISTO aumentada unas 2000 veces en esta fotografía de Eliahu Heldman al microscopio de barrido. Se puede observar la superficie interna de las células pilosas y numerosas estatoconias (dispersas aquí, al no producirse movimiento de los cilios que las mantiene agrupadas).



9. RESPUESTA DE UN CELULA PILOSA registrada en un sistema nervioso aislado que se giraba a diferentes velocidades. La fuerza centrífuga (fuerza gravitacional, *g*) impulsó a las estatoconias contra los cilios, volviendo el potencial de membrana de la célula pilosa más positivo y generando impulsos. Los axones celulares se seccionaron previamente para eliminar cualquier efecto sináptico sobre la célula.

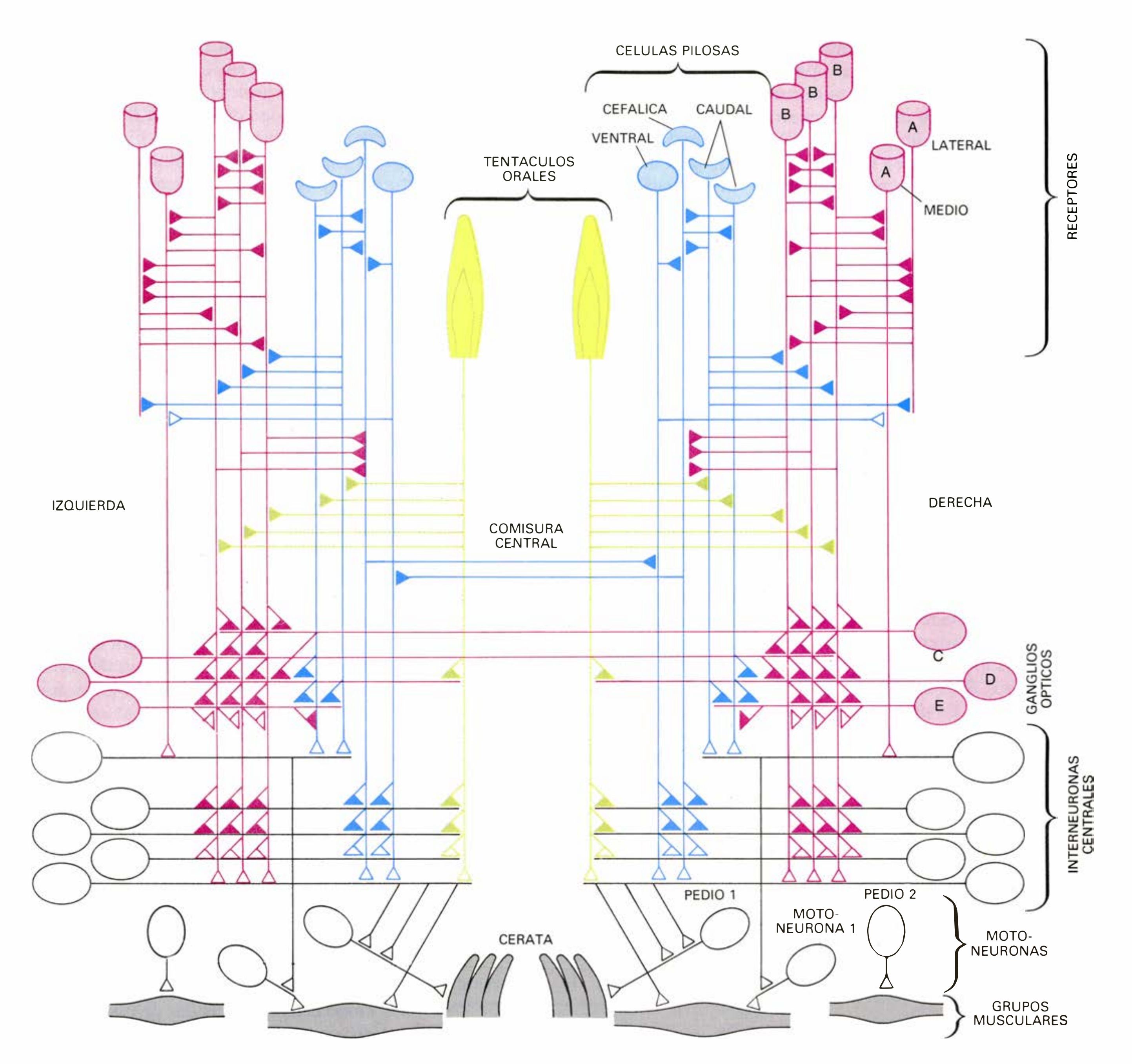
chas pruebas del aprendizaje asociativo, pues estos caracoles respondían con normalidad a la luz, pero no podían asociar luz con rotación.

Los resultados sugerían, a modo de resumen, que la capacidad de *Hermissenda* para aprender por asociación no se distinguía, a primera vista, de la que presentaba un perro (por no decir una ballena o un ser humano). Cabía inferir, pues, que los procesos básicos responsables de tal aprendizaje trascendían las diferencias entre especies. El primer paso hacia la comprensión de esos procesos fue definir, en el caracol, las vías que intervenían en la asociación entre la luz y la rotación.

Vías nerviosas

Empezamos por representar, en un diagrama de conexiones, el sistema nervioso de *Hermissenda*. Prestamos especial atención a dos vías sensoriales, la responsable del estímulo condicionado (luz) y la del estímulo incondicionado (rotación). En cada ojo del animal, la luz genera señales eléctricas en dos células fotorreceptoras de tipo *A* y en tres células fotorreceptoras de tipo *B*; las señales se transmiten secuencialmente a las interneuronas, motoneuronas y grupos de músculos. De transformar la rotación en señales eléctricas se encargan 13 células pilosas (denominadas así por los cilios en forma de pelo que tapizan su superficie interna) ubicadas en los estatocistos, dos órganos vestibulares primitivos análogos al oído interno de los mamíferos. Estas señales también se transmitirán a interneuronas, motoneuronas y grupos de músculos sucesivamente. Algunos terminales axónicos (se llama axón al eje que transporta el impulso nervioso de una neurona a otras) de la célula pilosa forman sinapsis (uniones) con los axones de las células receptoras visuales. Estas y otras interconexiones indirectas entre las vías visuales y vestibulares son el lugar de convergencia entre las dos modalidades sensoriales.

Para descifrar ambos circuitos recurrimos a métodos electrofisiológicos y a microfotografías de preparaciones teñidas. Se registraron con microelectrodos las respuestas eléctricas de las células a la luz o la rotación (o a la aplicación de microcorrientes que simularan estímulos naturales). La estimulación y registro de pares de células en miles de animales nos revelaron cuándo y cómo una determinada célula receptora respondía a un estímulo particular enviando impulsos nerviosos por el axón; des-



10. DIAGRAMA DE CONEXIONES del sistema nervioso de *Hermissenda*, resumido esquemáticamente. Se muestran las células representativas (y sus axones) de las vías visuales (*rojo*) y vestibulares (*azul*), así como algunos axones de las vías táctil-quimiosensorial (*verde*) y algunas interneuronas, motoneuronas y músculos (*negro*). Las interacciones sinápticas excitadoras se indican por triángulos vacíos y, las inhibidoras, por triángulos rellenos. Se ha demostrado la presencia real de cada interacción mediante el registro reiterado de potenciales presinápticos y postsinápticos aplicados simultáneamente.

cubrimos a qué neuronas postsinápticas se transmitía la señal y si ésta ejercía un efecto excitador o inhibidor. La repetición del proceso en células sucesivamente conectadas nos permitió determinar los circuitos que van desde los receptores sensibles a la luz y a la rotación hasta los músculos que impulsaban a *Hermissenda* en el agua. Los datos electrofisiológicos se complementaron con información procedente de fotografías obtenidas con los microscopios óptico y electrónico. El colorante inyectado en el cuerpo celular recorre el axón hasta sus puntos más alejados; así se localiza la fibra teñida en secciones histológicas sucesivas. Cuando se tiñen dos neuronas que se comunican entre sí, se evidencia su unión sináptica.

Por este procedimiento construimos un diagrama de conexiones que representaba una red de neuronas asociadas e interconectadas [*véase la figura 10*]. El diagrama era esencialmente el mismo en cuantos *Hermissenda* adultos estudiamos. Sin duda estaba determinado genéticamente; constituía el sustrato invariable para cualquier cambio inducido por un proceso de aprendizaje. ¿Cómo se alteraba su actividad con el condicionamiento? La investigación de los cambios se efectuó en tres niveles, de ámbito cada vez más circunscrito y específico.

El primer nivel era neuroanatómico. Se midieron, durante y después del condicionamiento, los cambios manifestados en las señales que se producían en determinadas neuronas y se transmitían a otras células. Averiguamos en qué neuronas cambiaban las señales primero y en cuáles se mantenía el cambio, identificando de esta forma los acontecimientos que realmente causa-

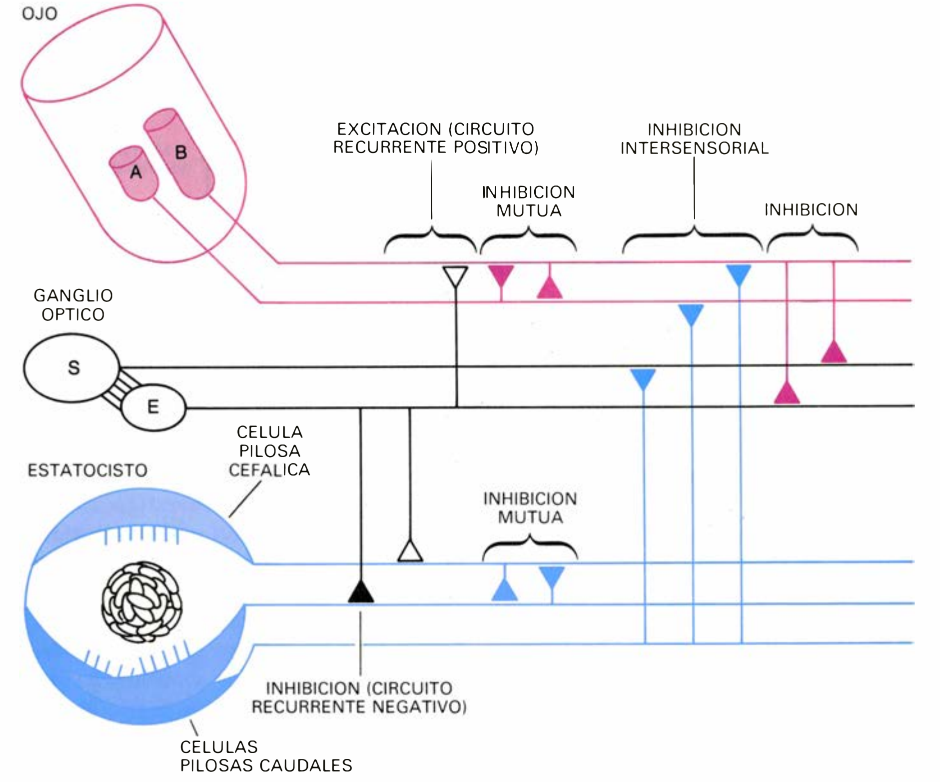
ban la adquisición y la retención del comportamiento condicionado. En un segundo nivel, el biofísico, nos centramos en la membrana celular de neuronas que sufrían cambios críticos. Se apreciaron diferencias en las corrientes que atravesaban las membranas, esto es, en el flujo de ciertos iones (átomos cargados eléctricamente), que explicaban los cambios de las señales. Por último, en un nivel bioquímico, identificamos las reacciones químicas que controlaban la alteración del flujo de iones.

Células *B* excitables

Nuestro estudio anatómico reveló un circuito de neuronas cuya actividad se modificaba en función de las características del estímulo al que se le exponía. El potencial de esta "remodelación" estaba implícito en la red de vías visuales y vestibulares y en sus interconexiones. Cuando, en el entrenamiento, se emparejaba la luz con la rotación, la respuesta principal del sistema consistía en excitar más de lo usual las tres células fotorreceptoras *B* de cada ojo y hacerlas más excitables. Es decir, la excitación de las células de tipo *B* subsiguiente a la estimulación por la luz mejoraba y persistía tras el entrenamiento.

No es éste un efecto directo, sino el resultado de una respuesta integrada en el emparejamiento de luz y rotación. Normalmente, las células pilosas que responden con mayor intensidad a la rotación descargan incluso en ausencia de excitación. Esta actividad "tónica" envía señales inhibidoras a las células de tipo *B*. Cuando las células pilosas se estimulan por sólo rotación, su actividad aumenta e inhiben más fuertemente las células *B*. Sin embargo, cuando la rotación cesa, la actividad de la célula pilosa se reduce por debajo incluso del nivel tónico, anterior a la estimulación, y las células *B* quedan liberadas de la inhibición. Si sumamos luz y rotación, se presentan, además, otros efectos. Las corrientes que fluyen cuando las células *B* transforman la luz relajan la resistencia eléctrica de la membrana de los fotorreceptores, "desviando" las señales inhibidoras de las células pilosas y, por tanto, disminuyendo el efecto inhibidor inducido por la rotación. Es más, las señales excitadoras que parten de células visuales de segundo orden (las células *E* del ganglio óptico) hacia las células de tipo *B* aumentan de frecuencia inmediatamente después del acoplamiento rotación-luz. Los efectos de una excitación reforzada se acumulan a lo largo del entrenamiento, con lo que las células *B* incrementan su excitabilidad tónica: su respuesta a la luz aumenta y se prolonga progresivamente.

La actividad de la célula *B*, como demostró en nuestro laboratorio Yasumasa Goh, provoca la inhibición de la cadena de neuronas que empieza en la célula medial de tipo *A* y es responsable de los impulsos de las motoneuronas que causan las contracciones musculares que impulsan al animal hacia la luz. Si la célula *B* refuerza y prolonga su respuesta, se incrementa la inhibición y, por consiguiente, remite la tendencia de desplazamiento hacia la luz.



11. LUGARES DE CONVERGENCIA entre las vías visuales y vestibulares, en un diagrama de células representativas que responden a la luz y a la rotación; entre ellas, una célula "silenciosa" del ganglio óptico (*S*) cuyos efectos se transmiten por medio de una célula (*E*), con la que está acoplada eléctricamente. Las células pilosas caudales presentan una actividad constante ("tónica") que tiende a inhibir los fotorreceptores de tipo *B*. La presentación simultánea de luz y rotación va seguida de una reducción de la inhibición de la célula pilosa por la de tipo *B* y por una mayor excitación de aquélla por la célula *E*.

Causalidad

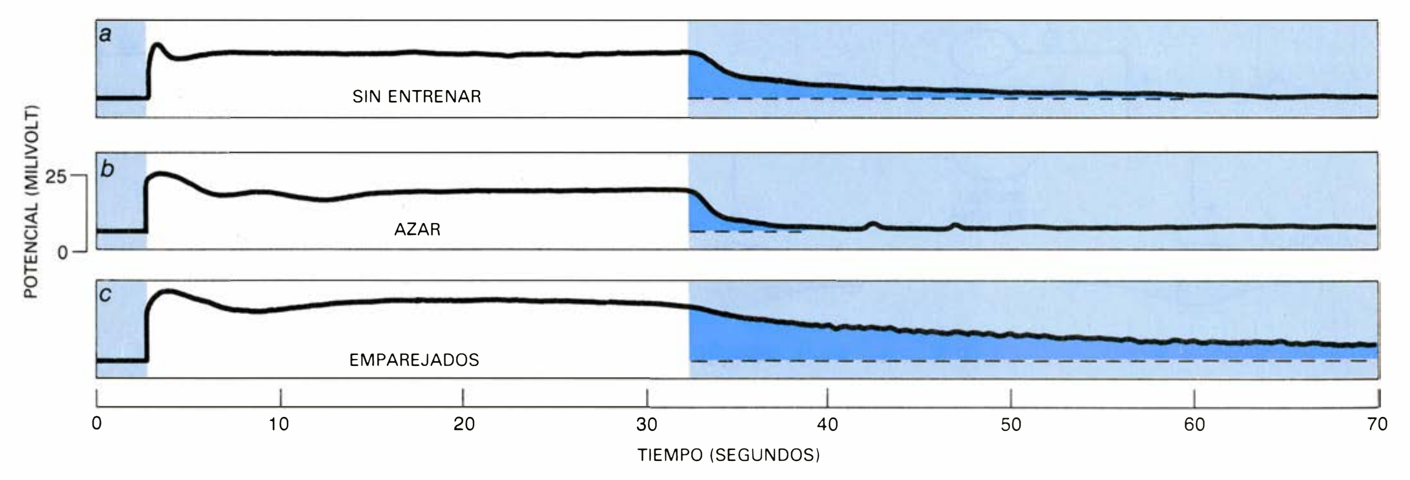
Numerosos hallazgos experimentales demostraron que la modificación de la respuesta de las células de tipo *B* no se ceñía a la mera correlación con el comportamiento de aprendizaje; en parte, al menos, causaba ese comportamiento. Esos experimentos de confirmación se hicieron "en ciego", es decir, los investigadores no conocían de antemano a qué proceso concreto de entrenamiento se había sometido a los animales. En un experimento se midió la actividad de las motoneuronas que intervenían en la reacción de aproximación hacia la luz. Como era de suponer, las motoneuronas de los animales condicionados (en los que cabía esperar un aumento de la inhibición originada en las células de tipo *B*) mostraron una actividad menor al exponer los animales a la luz.

En otro experimento con animales condicionados y control, desarrollado durante el período de retención, se seccionó el axón de células de tipo *B* en la proximidad del cuerpo celular, quedando éstos aislados física y eléctricamente del resto del sistema nervioso. Se evaluó la excitabilidad de las células aisladas en respuesta a la luz o a la aplicación de corrientes positivas. Varios índices diferentes de excitabilidad aumentaron en las células de tipo *B* de los animales que habían sido expuestos simultáneamente a luz y rotación. Dicho de otro modo, el incremento en la excitabilidad de la célula *B*, inducido por el condicionamiento, es intrínseco al cuerpo celular (y queda almacenado en éste); no se trata, pues, de ningún reflejo pasivo de los cambios que se producen en otro lugar del sistema.

Junto con Farley demostramos la causa u origen del aprendizaje por manipulación artificial de circuitos de neuronas de caracol. Al aplicar microcorrientes en determinadas células de dos vías convergentes, provocamos que las

12. RESPUESTA DE LAS CELULAS DE TIPO *B* alternando luz y rotación (*a*), sólo con luz (*b*) y simultaneando luz y rotación (*c*). En cada caso se muestra el segundo de los dos períodos sucesivos de luz (*área blanca*), habiendo finalizado el primero 40 segundos antes de que se inicie el trazo. El potencial de reposo inicial de las células está señalado por una línea discontinua; la amplitud de la despolarización duradera que sigue a la segunda exposición a la luz queda puesta de relieve con el color oscuro. Se ve que los estímulos acoplados causan la despolarización más duradera de las células de tipo *B* (*c*).

células enviaran las mismas señales que emitían en respuesta a los estímulos naturales. En un ensayo trabajamos con el sistema nervioso aislado del cuerpo del caracol, aplicando corrientes en las células pilosas y en células visuales de segundo orden del ganglio óptico. Aplicaciones repetidas de corrientes, simultaneadas con luz, reforzaron la excitabilidad de la célula *B*; las mismas aplicaciones sin luz (que ahora imitaban a uno de nuestros grupos control durante el entrenamiento) no tuvieron ese efecto. En otro experimento alcanzamos el comportamiento condicionado sencillamente emparejando luz con la aplicación reiterada, a una determinada célula de tipo *B* expuesta de un animal vivo, de una corriente calculada para simular los efectos sinápticos que recibe la célula *B* cuando las células pilosas se



13. CAMBIO DE LA EXCITABILIDAD. Según se demuestra en estos registros, es una propiedad intrínseca de la célula de tipo *B*. Se midió el potencial de tres células *B* (cuyos axones se habían seccionado para aislarlas de las otras neuronas). Las células provenían de un animal desentrenado (*a*), y de animales entrenados en las siguientes situaciones: animales sometidos a la luz y rotación al azar (*b*) y de un ejemplar condicionado simultaneando luz y rotación (*c*). La despolarización duradera (*color oscuro*) que siguió a la exposición a la luz resultó más larga en los animales que estaban condicionados (*c*).

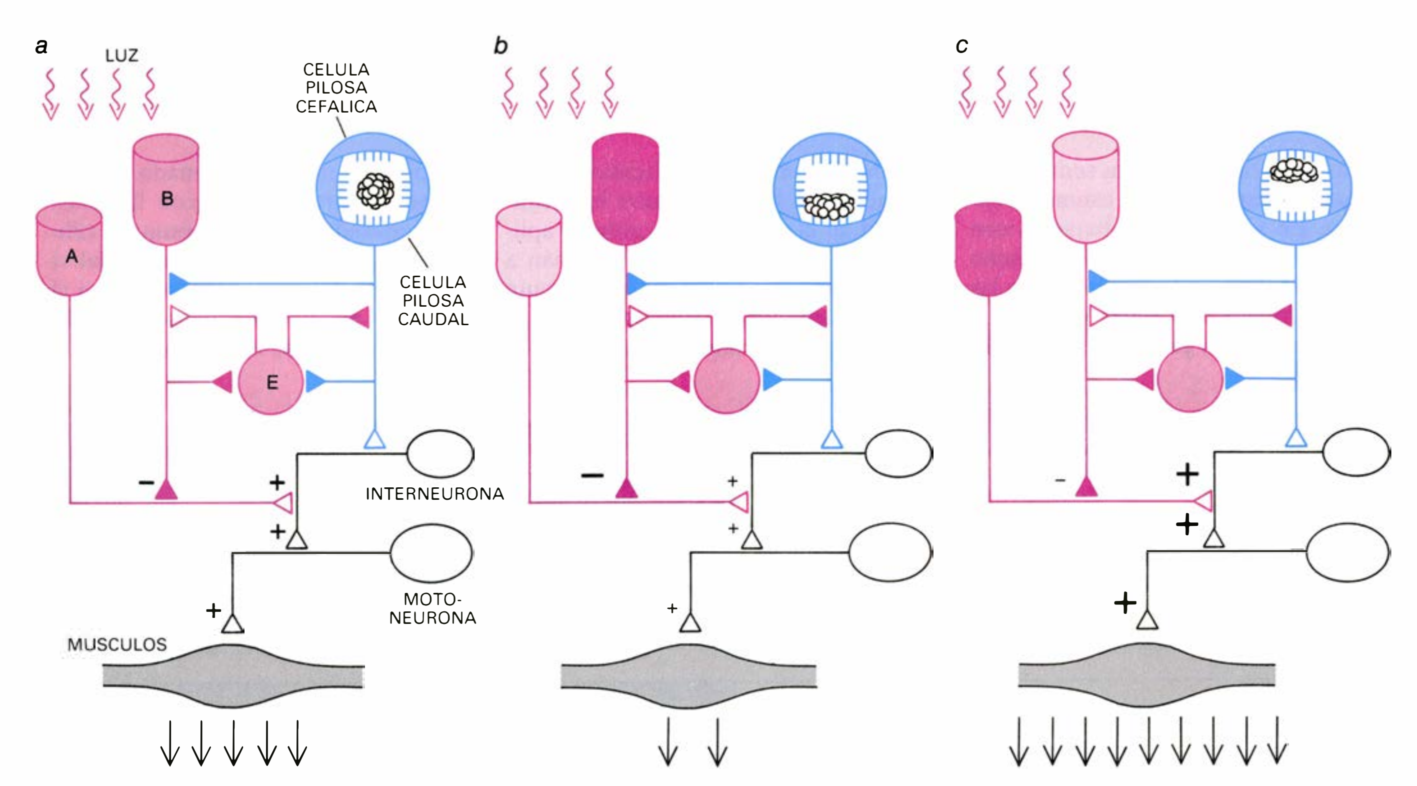
estimulan por rotación. Observamos que la excitabilidad de la célula *B* aumentaba inmediatamente. En los días posteriores a la aplicación, después de que los animales se recuperaran de la manipulación, la velocidad de movimiento hacia la fuente de luz era menor, como ocurría con los animales condicionados. Los animales control a quienes se aplicaron corrientes no simultaneadas con luz no mostraron tal cambio.

La demostración final de la razón de ser del aumento de la excitabilidad en las células de tipo *B* vino con la confirmación de un pronóstico conductual. Las conexiones entre las células visuales y vestibulares están establecidas de tal forma que al girar el animal con la cabeza hacia el centro de rotación se estimulan las denominadas células pilosas caudales, dando lugar a que las células de tipo *B* se vuelvan más excitables, como se describió anteriormente. Por contra, el entrenamiento del animal con la cabeza en dirección opuesta estimula las llamadas células pilosas cefálicas, lo que provoca una mayor inhibición de las células de tipo *B*. Sería lógico, pensamos, que en este último caso la respuesta fototáctica aumentara. Pasamos al ensayo y se confirmó la predicción: las células de tipo *B* se volvían menos excitables y los animales se desplazaban más rápidamente hacia la luz. (La agitación sin una orientación predominante, como ocurre en el mar turbulento, provoca una excitación neta de las células de tipo *B*, puesto que las células pilosas caudales tienen una conexión sináptica más directa y eficaz con los fotorreceptores que las células cefálicas.)

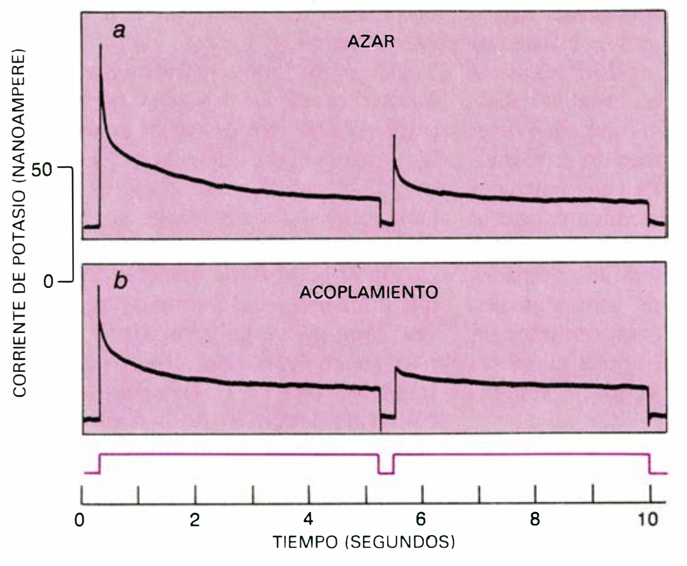
Cambios en la membrana

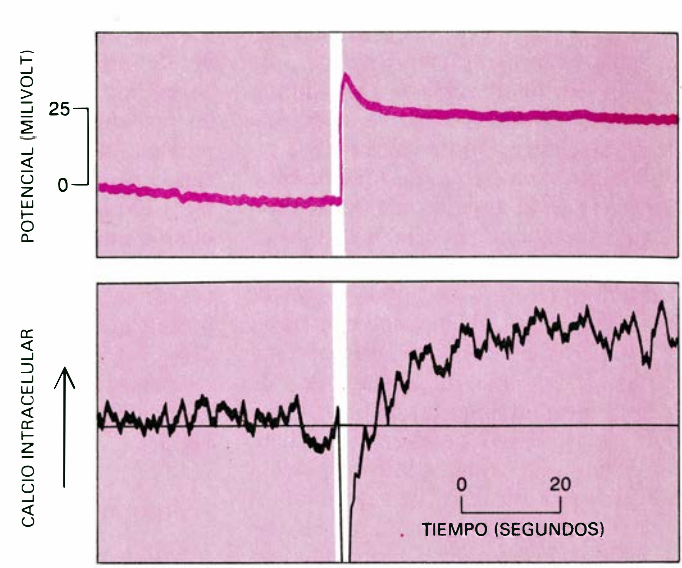
Nuestros datos neuroanatómicos constituyeron la primera prueba de que el aprendizaje asociativo duradero en cualquier animal, vertebrado o invertebrado, es el resultado directo de un cambio en la excitabilidad de ciertas neuronas, identificables. Ahora bien, la excitabilidad es una propiedad de la membrana de la célula nerviosa; ¿qué ocurre, pues, en la membrana de las células de tipo *B* durante el condicionamiento? Antes de analizar nuestros hallazgos se impone explicar brevemente cómo generan señales eléctricas los cambios en la membrana de la neurona. En reposo, la neurona, el cuerpo celular y sus prolongaciones están polarizados. El interior de la célula es unos 70 milivolt negativo con respecto al exterior. La diferencia de potencial se mantiene por la concentración de iones dentro y fuera de la célula; concentración que está regulada por la permeabilidad selectiva de la membrana celular, perforada por canales proteicos que se pueden abrir y cerrar, y que son específicos para cada ion. Los principales factores en el establecimiento del potencial de membrana son los iones positivos potasio y sodio. Hay una concentración mucho más elevada de potasio dentro de la célula y de sodio fuera de ella. La membrana suele mostrarse mucho más permeable al potasio que al sodio: los iones de potasio tienden a filtrarse hacia afuera, dejando negativo el interior de la célula en reposo.

Los canales iónicos de la membrana celular se abren en respuesta a un estímulo sensorial (en el caso de una célula receptora), por efecto de un transmisor químico de la membrana postsináptica o por una alteración del potencial de membrana. Cuando se abren los canales de sodio, los iones de sodio (y en la célula de tipo *B* también los iones positivos de calcio) fluyen hacia el interior, despolarizando la célula (haciendo el interior más positivo). Casi inmediatamente, la despolarización provoca la



14. LA RESPUESTA DEL ANIMAL A LA LUZ se modifica por los efectos del condicionamiento. El diagrama de conexiones básico es invariable; el fotorreceptor de tipo *B* inhibe al fotorreceptor medio de tipo *A*, cuya estimulación por la luz causa la excitación de la interneurona, motoneurona y músculos. Cuando la célula pilosa envía impulsos, la célula *B* se inhibe (directamente y por medio de la célula *E* de segundo orden). Después de esos impulsos, la célula pilosa se torna inactiva y la célula *E* más activa, a consecuencia de lo cual la célula *B* se excita. Esta es la situación en un animal desentrenado (*a*); los efectos sinápticos se acrecientan cuando la luz y la rotación van parejas, aunque sólo sea una vez. La repetición simultánea de la luz con la rotación, con el caracol orientado para excitar sus células pilosas caudales (condicionamiento negativo), da lugar a un aumento duradero de la excitabilidad de la célula *B*, reforzando la inhibición que ejerce sobre la célula de tipo *A* durante y después la exposición a la luz y, por tanto, frenando el movimiento hacia ésta (*b*). El condicionamiento positivo (con el animal en una orientación opuesta) excita las células pilosas cefálicas y provoca un efecto contrario (*c*).





15. EL FLUJO DE POTASIO HACIA EL EXTERIOR se reduce en las células de tipo *B* de un animal condicionado en los días siguientes al entrenamiento. Se aplicó un cambio de potencial (incremento de 50 milivolt) en la célula *B* (*trazo de color, abajo*) y se midió la corriente resultante, equivalente al flujo de salida de iones potasio (*trazos negros*). El flujo es mayor en la célula de un animal expuesto de forma aleatoria a luz y rotación (*a*) que en la célula de un animal condicionado mediante el acoplamiento de luz y rotación (*b*), siendo mayor la diferencia en el segundo de los dos cambios sucesivos de potencial.

16. EL NIVEL DE CALCIO INTRACELULAR aumenta tras la aplicación de un estímulo luminoso. Se inyectó en una célula de tipo *B* un colorante que se combina con el calcio formando un complejo que absorbe la luz a una determinada longitud de onda; se registró la absorbancia para utilizarla como medida de la concentración de calcio en la célula. El interior de la célula se tornó más positivo (*trazo de color*) en respuesta a un destello de luz (*franja blanca*). Creció el nivel de calcio (*en negro*), que persistió elevado mientras el potencial de membrana de los fotorreceptores se mantenía aumentado.

apertura de los canales de potasio, catión que fluye hacia el exterior restaurando el potencial negativo de reposo. Estos cambios del potencial de membrana se extienden localmente a lo largo de la membrana y, en algunos casos, dan lugar a una despolarización mucho mayor, que puede propagarse por todo el axón; se constituye así el potencial de acción o impulso nervioso.

Observamos que el flujo hacia el exterior de iones potasio (a través de los denominados canales *A* y probablemente también a través de otros canales de potasio), durante la despolarización inducida por la aplicación de corrientes en ausencia de luz, se reducía en los días posteriores al condicionamiento, mientras que crecía el flujo hacia el interior de iones calcio (a través de otros canales), tras la excitación inducida por la luz. Ambos cambios provocaban un aumento de la despolarización de la célula de tipo *B* en respuesta a la excitación producida por la luz o por una corriente, es decir, la hacían más excitable. (Pudiera ser, aunque no se sabe con certeza, que el aumento del flujo de calcio se debiera al refuerzo de la excitabilidad provocado por la reducción del flujo de potasio.) Con John A. Connor, de los Laboratorios Bell, encontramos que los iones calcio tendían a acumularse en el interior de la célula de tipo *B* durante la adquisición del comportamiento condicionado. Una prolongada elevación del calcio intracelular menguaba el número de canales *A* de potasio abiertos. La reducción del flujo de potasio al exterior hacía la membrana más excitable. En presencia de luz, ésta se despolarizaba más fácilmente, con lo que se abrían más canales de calcio, aumentando el flujo de calcio y, por consiguiente, provocando un incremento adicional del calcio intracelular, lo que a su vez reducía el número de canales de potasio abiertos; y así sucesivamente, según un circuito recurrente positivo.

El circuito se refuerza durante el aprendizaje. Con repeticiones sucesivas de estímulos emparejados a intervalos suficientemente breves, se produce un aumento residual cada vez mayor de la despolarización de tipo *B*, que a su vez parece amplificar la interacción de los canales de calcio y potasio. Puede también que los canales experimenten cambios complementarios en neuronas unidas sinápticamente. Tenemos pruebas provisionales de que la membrana del fotorreceptor medio de tipo *A*, el que resulta inhibido por las células de tipo *B*, es menos excitable después del condicionamiento, situación inversa a la que se dan en las células de tipo *B*.

Mecanismos bioquímicos

Establecimos la hipótesis siguiente: si el nivel de calcio en las células de tipo *B* aumentaba durante el condicionamiento, y ese incremento iba acompañado de cambios en el flujo de iones a través de los canales de la membrana, quizás el calcio afectara a los canales mediante la iniciación o la estimulación de ciertas reacciones bioquímicas. El calcio está implicado en muchos mecanismos reguladores, especialmente en la activación de enzimas responsables de enlazar grupos fosfato a las proteínas. Esa fosforilación altera frecuentemente el carácter de la proteína. Parecía plausible que el aumento del calcio intracelular activase enzimas que enlazan grupos fosfato con proteínas de la membrana implicadas en el control de la apertura y cierre de los canales *A* de potasio y los de calcio.

Numerosas observaciones apoyaron la hipótesis. Primero, Joseph T. Neary midió la incorporación de grupos fosfato (marcados con un isótopo radiactivo) en ciertas proteínas que parecen constituir, o estar asociadas con, los canales de potasio y calcio de la membrana. El número neto de grupos fosfato incorporados en una de esas proteínas era diferente en los animales condicionados y en los animales control. Con anterioridad, Paul Greengard, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, descubrió que la fosforilación de ciertas proteínas de membrana en varias especies de vertebrados venía mediada por el calcio. Nosotros, junto con Leonard K. Kaczmareck y Susan A. DeRiemer, de Yale, en colaboración con Greengard, relacionamos los hallazgos de Greengard con los de Neary. Se demostró que, en *Hermissenda*,

la fosforilación de varias proteínas del sistema nervioso, incluyendo la que Neary puso de manifiesto que cambiaba con el condicionamiento, dependía de la concentración de calcio.

Comprobamos el papel fundamental del calcio en el aumento de la excitabilidad inyectándolo en células de tipo *B*. La inyección provocó una prolongada reducción del flujo de potasio a través de los canales *A*, al igual que ocurría en el condicionamiento. Por último, a sugerencia de Howard Rasmussen, de Yale, inyectamos en las células *B* una quinasa proteica dependiente de calcio, un enzima que cataliza la fosforilación mediada por el calcio. La inyección reforzó el efecto del calcio en los canales *A*; simuló el efecto del condicionamiento, dando lugar al mismo aumento de excitabilidad que provocaba el descenso del flujo de iones potasio y el incremento del flujo de iones calcio.

En resumen, nuestros estudios bioquímicos daban a entender que, durante la adquisición, el nivel de calcio intracelular se elevaba progresivamente. El ion activaba los enzimas dependientes de calcio que facilitan la fosforilación de las proteínas de membrana que regulan el flujo de iones calcio y potasio. Al finalizar el entrenamiento, el calcio intracelular desciende al nivel normal, aunque durante todo el período de retención del comportamiento aprendido persiste la fosforilación de las proteínas. (Como ha señalado Rasmussen, la fosforilación mediada por el calcio puede ser un proceso irreversible.) El elevado nivel de calcio intracelular durante el entrenamiento podría causar una activación duradera, a través de la fosforilación de las quinasas proteicas. Los enzimas activados podrían ser entonces los responsables de los persistentes cambios de la membrana que mantienen reforzada la excitabilidad.

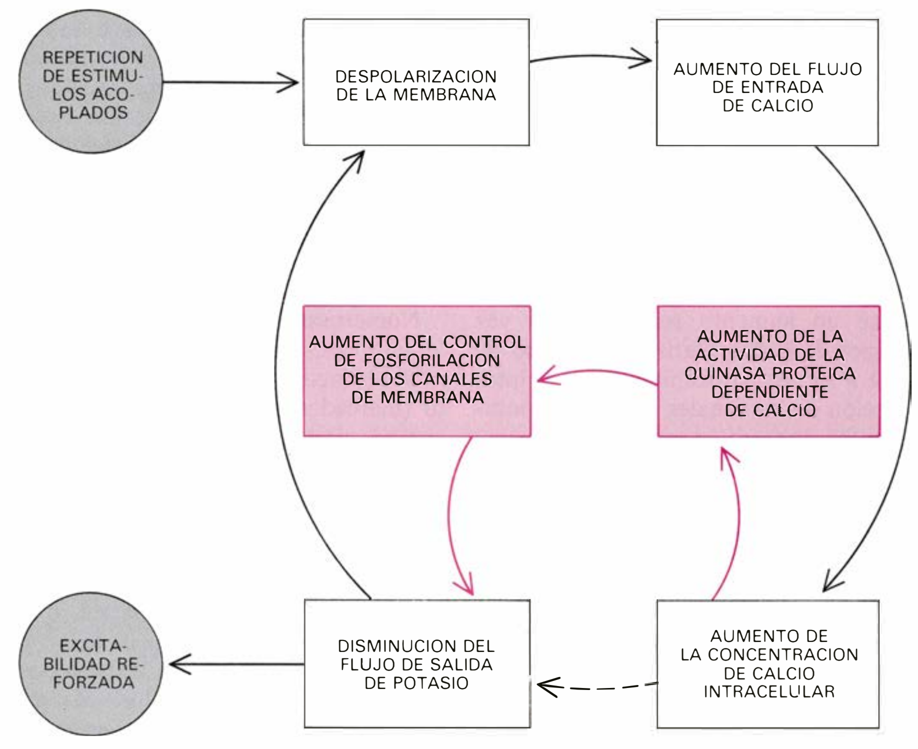
Aprendizaje de los vertebrados

Nuestros hallazgos demostraron, por primera vez, en un sistema nervioso, que el aprendizaje asociativo que dura varios días entraña cambios a largo plazo en la regulación bioquímica de los iones que fluyen a través de la membrana celular. Los cambios observados no se ubican en las sinapsis, sino en los cuerpos celulares y a lo largo de los axones. Quizá haya cambios sinápticos implicados en el aprendizaje asociativo, aunque no se han encontrado pruebas de tales cambios. Las alteraciones de la permeabilidad de la membrana no sináptica justifican el comportamiento de aprendizaje que se ha estudiado en *Hermissenda*.

Los organismos marinos sirven de maravillosos modelos para revelar los principios básicos de varios aspectos de la función nerviosa que, según se ha demostrado repetidamente, son de aplicación general a los animales superiores. Hemos empezado a comprobar la aplicación al cerebro de vertebrados de lo que habíamos descubierto sobre las bases bioquímicas del aprendizaje asociativo en *Hermissenda*. Recientemente, junto con Charles D. Woody, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en Los Angeles, y Bruce A. Haye inyectamos la quinasa proteica mencionada antes (el enzima cuya inyección en las células de tipo *B* simulaba los efectos del condicionamiento) en ciertas neuronas del cerebro de gato. La actividad de esas neuronas se ha correlacionado con el aprendizaje. La inyección del enzima produjo cambios en la excitabilidad de la membrana de la neurona del gato que eran similares a los generados en la célula de tipo *B*.

Tal persistencia de un mecanismo bioquímico común, a lo largo de la evolución, no implica, de ninguna manera, identidad de función. Aun cuando se considere sólo el aprendizaje asociativo, la distancia que separa la función nerviosa de un caracol de la de un ser humano es abismal. Media, en primer lugar, una gran diferencia en la capacidad para resolver información sensorial y para asociar estímulos. Las especies inferiores pueden aprender a asociar un escaso rango de estímulos; en cambio, los humanos asocian cualquier cosa que perciban. La conciencia humana permite el olvido consciente, o represión, y coloca las percepciones dentro de un contexto muy emocional, con una gradación de sentimientos positivos y negativos que confieren a las asociaciones valor y significado.

Gran parte de la biofísica y bioquímica del comportamiento quizá sea, con todo, bastante similar en caracoles y en seres humanos. A lo mejor la diferencia estriba en el diagrama de conexiones nerviosas. Recuérdese que en *Hermissenda* los fotorreceptores de tipo *B* se vuelven más excitables durante el condicionamiento debido a que se abren pocos canales de potasio y muchos canales de calcio en respuesta al estímulo y porque, a su vez, los iones de calcio provocan un aumento de la activación de un enzima. Sin embargo, los fotorreceptores de tipo *A* tienen el mismo tipo de canales y el mismo potencial para desarrollar cambios de ex-



17. CIRCUITO RECURRENTE POSITIVO que justifica el refuerzo de la excitabilidad de la membrana de las células de tipo *B*. En el plano biofísico (*rectángulos negros*) el incremento de la despolarización durante el condicionamiento aumenta el flujo de ión calcio; el incremento de calcio intracelular reduce el flujo de potasio, despolarizando aún más la membrana. Se muestran dos fases de regulación bioquímica (*ciclo de color*). La elevada concentración de calcio activa la quinasa proteica dependiente de calcio, que fosforila las proteínas reguladoras de los canales de membranas, menguando el flujo de potasio.

citabilidad. Es el diagrama de conexiones de las vías visuales y vestibulares lo que hace que las células de tipo *B* reciban una excitación más intensa y, por tanto, se vuelvan más sensibles cuando el caracol se entrena con la cabeza hacia el centro de rotación. El mismo diagrama de conexiones determina que los receptores de tipo *A*, y no las células de tipo *B*, se tornen más excitables cuando el animal se entrena en la orientación opuesta. El impacto de una combinación especial de estímulos con una precisa relación temporal y con un particular diagrama de conexiones programado genéticamente aviva un grupo de células e inhibe otro.

Admitamos que miles de millones de neuronas del cerebro humano pueden tener el mismo potencial que las células de *Hermissenda* para aumentar o disminuir su excitabilidad o inhibición. No se trata de ninguna hipótesis irracional; parecidos canales de potasio y calcio se han descrito en invertebrados y vertebrados superiores. Consideremos también que la cantidad relativa de excitación recibida por cada neurona de un grupo de células cerebrales humanas depende de un diagrama de conexiones preexistente y de la naturaleza y secuencia de los estímulos sensoriales. Al igual que la excitabilidad relativa de los fotorreceptores se altera cuando *Hermissenda* aprende, la excitabilidad relativa de las neuronas del cerebro humano puede experimentar cambios duraderos instados por experiencias conscientes. Los cambios fundamentales, biofísicos y bioquímicos, responsables del almacenamiento de la información aprendida en los seres humanos, no tienen por qué ser muy diferentes de los mecanismos ahora manifestados en *Hermissenda*.

Lo que un animal puede aprender y cuánto puede aprender está estructurado y limitado por el diagrama de conexiones de su sistema nervioso. El ingente número de neuronas del cerebro humano y la complejidad de sus circuitos puede proporcionar el potencial para registrar diferencias sutiles entre los estímulos, para asociar estímulos y para asociar las asociaciones, es decir, para aprender mediante una abstracción progresiva. La diferencia entre lo que pueden aprender un hombre y un caracol quizá derive de las diferencias en sus diagramas de conexiones, y no de algunas propiedades especiales de la membrana celular o de ciertos mecanismos de control bioquímico que distinguen las neuronas humanas de las células nerviosas del caracol.

Empaquetamiento microelectrónico

Los métodos utilizados para montar, refrigerar e interconectar los elementos de silicio en un ordenador desempeñan un papel importante en su funcionamiento. El reto está en situar un gran número de ellos en el menor volumen posible

Albert J. Blodgett, Jr.

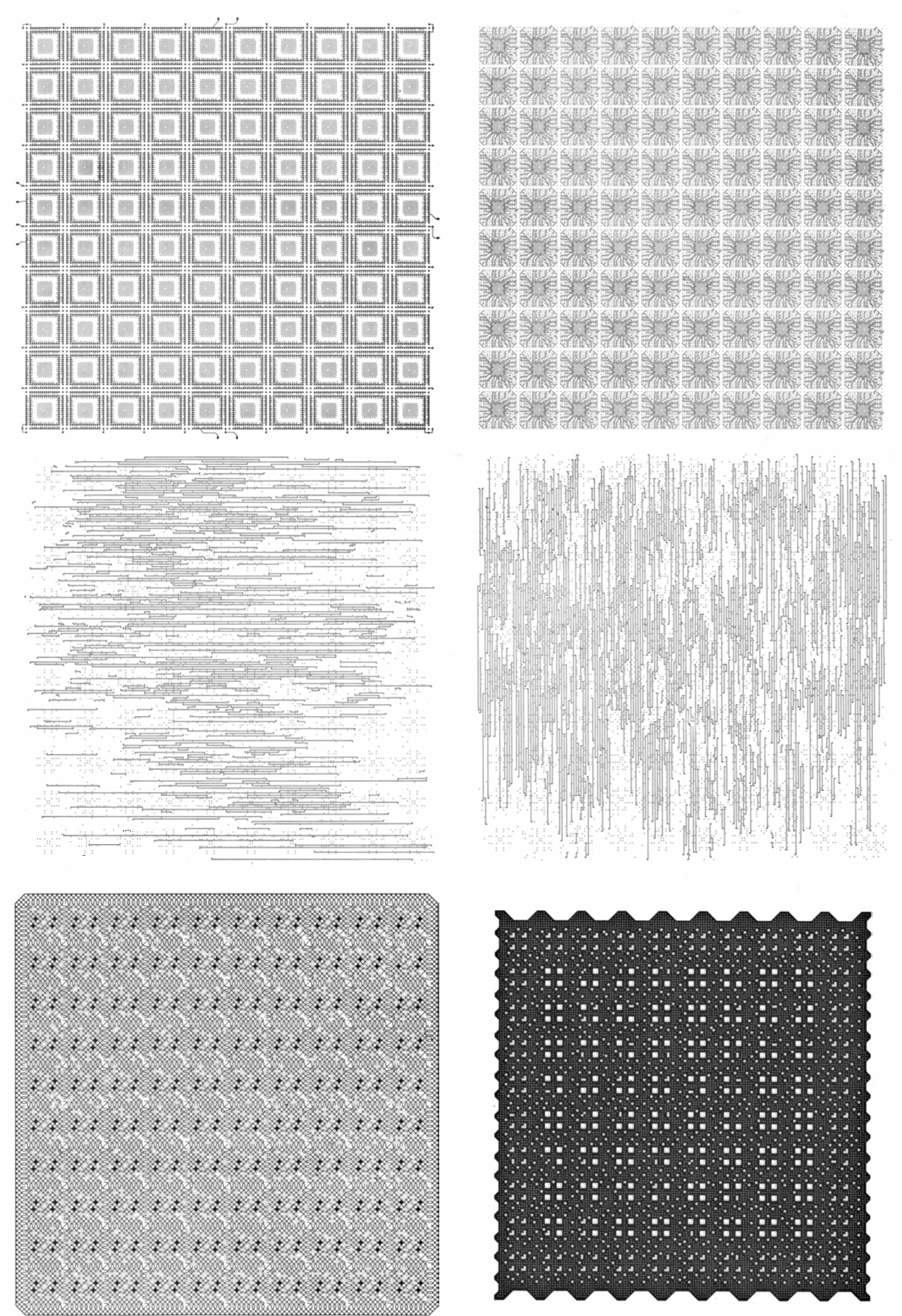
A primera vista, pudiera parecer que el empaquetamiento de las pastillas microelectrónicas de silicio ("chips") en un ordenador digital de alta velocidad es un detalle secundario en el diseño de estas máquinas. Se podría argumentar que el procesamiento real de la información se lleva a cabo totalmente en los circuitos montados sobre las pastillas; la función del empaquetamiento se limitaría a interconectar las pastillas y los otros dispositivos que constituyen el sistema con el fin de distribuir la energía eléctrica y proporcionar un medio operativo adecuado. Evidentemente, todo ordenador necesita cierto empaquetamiento, pero, en principio, la naturaleza de éste no debería incidir demasiado en el funcionamiento de la máquina. Los hechos contradicen esta presunción. En muchos sistemas de proceso de datos de alta velocidad, la técnica de empaquetamiento es el factor determinante de su funcionamiento, coste y fiabilidad.

El motivo por el que el empaquetamiento es tan importante radica en el imperativo de hacer que los elementos centrales de un ordenador sean lo más compactos posible. Los avances en el diseño y la fabricación de dispositivos microelectrónicos han incrementado considerablemente el número de funciones lógicas que pueden situarse en una pastilla y la velocidad con que se llevan a cabo las operaciones aritméticas. Como consecuencia de este hecho, una fuente importante de retardo en la unidad central de proceso de muchos ordenadores es, hoy, el tiempo necesario para que una señal pase de una pastilla a otra. Con el fin de acortar al máximo dicho intervalo, las pastillas deben estar lo más juntas posible. Teniendo en cuenta que cada elemento de éstos dispone de muchos terminales, el montaje de un número elevado de pastillas en un pequeño volumen constituye todo un reto para las técnicas de empaquetamiento en diversos frentes. En primer lugar, existe poco espacio disponible para los miles de conductores que se necesitan para distribuir la energía eléctrica y las señales portadoras de información entre las pastillas. Por otro lado, las propiedades eléctricas de esta red de conductores deben ser tales que la distorsión de las señales sea la menor posible; la dificultad de satisfacer este requisito aumenta a medida que crecen las velocidades de conmutación y menguan las dimensiones. Finalmente, una serie compacta de pastillas produce una cantidad de calor notable; calor que hay que sacar del sistema para conseguir que los circuitos operen adecuadamente. En muchos casos, el problema térmico es el que plantea las mayores dificultades.

Los proyectistas de ordenadores digitales de diseño avanzado han desarrollado varias soluciones ingeniosas para todos estos problemas. Nos detendremos en algunas consideraciones generales acerca del diseño de las diferentes técnicas de empaquetamiento. Describiré también, con algún detalle, el sistema desarrollado para el ordenador 3081 de la International Business Machines Corporation. Los grandes ordenadores de este tipo plantean exigencias muy severas acerca de los métodos de empaquetamiento y los materiales utilizados en su construcción. La tecnología que expondré aquí interconecta más de 100 pastillas –capaces de incorporar todos los circuitos equivalentes a una unidad central de proceso de un ordenador más antiguo– en un módulo que cabe en la palma de la mano.

Durante algo más de una década, la jerarquía de los empaquetamientos en un ordenador típico se ha escalonado tres niveles diferenciados. Cada pastilla está montada permanentemente sobre su propio portador, constituido por un receptáculo de plástico o cerámica provisto de una docena o más de contactos metálicos. Un conjunto de estos portadores de pastillas, junto con algunos componentes discretos tales como resistores o condensadores, están montados en una placa de fibra de vidrio impregnada con una resina epoxy. Los circuitos de conducción eléctrica están impresos en la superficie de la placa; en algunos casos, dicha placa está laminada y consta de un conjunto de capas de circuitos impresos diferentes. Mediante unas conexiones adecuadas sitas en uno de sus lados, se pueden unir varias placas diferentes a un armazón de mayor tamaño dotado, a su vez,

1. RED DE CONDUCTORES para conectar entre sí a las 100 pastillas de silicio que constituyen la unidad central de proceso de un ordenador. Cada una de las figuras que se reproducen en la página opuesta corresponde a una de las capas de una placa cerámica, que puede estar constituida por un total de 33 capas diferentes. En la parte superior izquierda de la ilustración se reproduce la primera de estas capas. Las pastillas se unen eléctricamente a esta capa a través de una matriz compacta de terminales situada en los lugares que ocupan dichas pastillas. En la parte superior derecha vemos una de las cinco capas de redistribución que llevan señales desde los contactos de una pastilla hasta los terminales de prueba que la rodean. Las dos capas del centro de la ilustración son otros tantos planos de señales, a través de los cuales se establece una comunicación entre las pastillas; todos los conductores que existen en un plano dado están orientados paralelamente al eje *x* o al eje *y*. La placa entera consta de 16 planos de estos. Entre cada pareja de planos de señales se intercala un plano de referencia de voltaje, como el que se reproduce en la parte inferior izquierda de la figura; estos planos ayudan a definir las propiedades eléctricas de las líneas de señales. La capa de la parte inferior derecha representa una de las tres que se utilizan para suministrar energía a las pastillas. En la placa ya terminada, estas capas se apilan, laminan y calientan hasta conseguir su fusión, dando lugar así a una pieza de cerámica en forma de baldosa. El tamaño de las figuras que se reproducen aquí es aproximadamente el mismo que el de las placas reales.



de un circuito impreso cuya misión es la de conectar entre sí a todas esas placas. El conjunto entero de portadores de pastillas, placas y armazón (placa principal) queda unido al resto del sistema (incluidos los otros conjuntos de este mismo tipo) mediante una serie de cables multiconductores.

Los tres niveles jerárquicos de empaquetamiento persisten todavía en muchos ordenadores, en especial los conocidos como miniordenadores. Sin embargo, tanto en los sistemas de baja como de alta velocidad, los avances tecnológicos han posibilitado la utilización de un solo nivel jerárquico. En el caso de los microordenadores, cada pastilla está situada aun en un portador independiente; ahora bien, debido al enorme incremento en el número de circuitos por pastilla, la cifra de éstas se ha reducido hasta el punto de que todas ellas se alojan sobre una placa única. En algunos de los ordenadores más recientes se ha dado un nuevo paso: muchas pastillas se presentan fijas a un sustrato único, formando un módulo multipastilla que se puede conectar directamente a una placa grande. Estos avances han eliminado, en ambos casos, el nivel de la placa intermedia.

La evolución de los dispositivos microelectrónicos y de la tecnología de empaquetamiento son muy interdependientes. Por ejemplo, la inclusión de un mayor número de circuitos en una única pastilla exige, en general, la adición de más contactos eléctricos, pero esto sólo es factible si el empaquetamiento puede acomodar las oportunas conexiones adicionales y líneas de señal. Por otra parte, las pastillas con más circuitos suelen consumir más potencia; en consecuencia, su incorporación a un sistema plantea la exigencia de que el empaquetamiento sea capaz de disipar el calor adicional. Debido a estas relaciones, las restricciones que condicionan en la actualidad el diseño de los empaquetamientos sólo se pueden comprender adecuadamente si se toma en consideración la naturaleza de las pastillas que se pretende empaquetar.

La introducción de los circuitos integrados constituyó un hito en la evolución de la tecnología de los semiconductores. Un circuito integrado consiste en una combinación de varios transistores y otros elementos básicos sobre una pieza de silicio. Los primeros tipos surgieron a principio de la década de 1960 e incluían tan sólo de seis a ocho transistores, diodos y resistores, los suficientes para desempeñar una "puerta" o función lógica elemental. Una puerta típica recibe dos o tres señales de entrada y proporciona una sola señal de salida; la forma de las señales de entrada determina que la de salida se produzca o no. Se necesitarían algunos centenares de puertas para construir una unidad funcional de un ordenador que actuara como una sumadora.

PASTILLA
PORTADOR DE UNA PASTILLA
PLACA
CABLE
ARMAZON

2. JERARQUIA DE LOS EMPAQUETAMIENTOS en un ordenador digital de gran tamaño. Se escalona tradicionalmente en tres niveles. Cada pastilla se aloja en un portador individual; cierto número de estos portadores y otros componentes están unidos a una placa de circuito impreso; a su vez, varias de estas placas están montadas sobre un armazón de mayor tamaño. El conjunto se conecta al resto del sistema mediante una serie de cables. La introducción de un módulo capaz de alojar más de 100 pastillas ha eliminado un nivel: se ha reducido el número de interconexiones y la longitud del cableado.

Los primitivos circuitos integrados estaban construidos sobre una pastilla de silicio con una superficie de varios milímetros cuadrados; los elementos más pequeños de la correspondiente circuitería tenían un tamaño del orden de 10 a 20 micrometros. La pastilla se enlazaba al resto del sistema mediante ocho o diez terminales. El retardo de conmutación, que representa el tiempo que transcurre entre la llegada de una señal de entrada y la producción de una señal de salida, estaba comprendido entre 20 y 40 nanosegundos (una nanosegundo equivale a una mil millonésima de segundo).

Los avances en la manufactura de los semiconductores durante los últimos 20 años han sido espectaculares. La superficie máxima disponible sobre una pastilla ha aumentado más de 10 veces (hasta alcanzar los 50 milímetros cuadrados) y el tamaño de los elementos se ha reducido en un factor similar (del orden de 1,5 micrometros). Se han construido pastillas lógicas de alta velocidad con más de 40.000 transistores y otros elementos del circuito, organizados en 5000 puertas que se abren y cierran en dos nanosegundos. Una pastilla de este tipo puede tener unos 200 contactos eléctricos.

Los circuitos integrados utilizados en un ordenador de alta velocidad están constituidos por unos elementos conocidos como transistores bipolares. Las pastillas basadas en otro tipo de transistor, el transistor de efecto de campo, incorporan muchos más elementos por unidad de superficie. Por ejemplo, se han construido microordenadores y otros dispositivos relacionados con ellos utilizando una sola pastilla con más de 100.000 transistores de efecto de campo. A la vista de este hecho, cabe preguntarse por qué se siguen empleando transistores bipolares en la construcción de los grandes ordenadores. La razón estriba en la velocidad de los mismos: en general, el retardo de conmutación de estos transistores es sensiblemente menor.

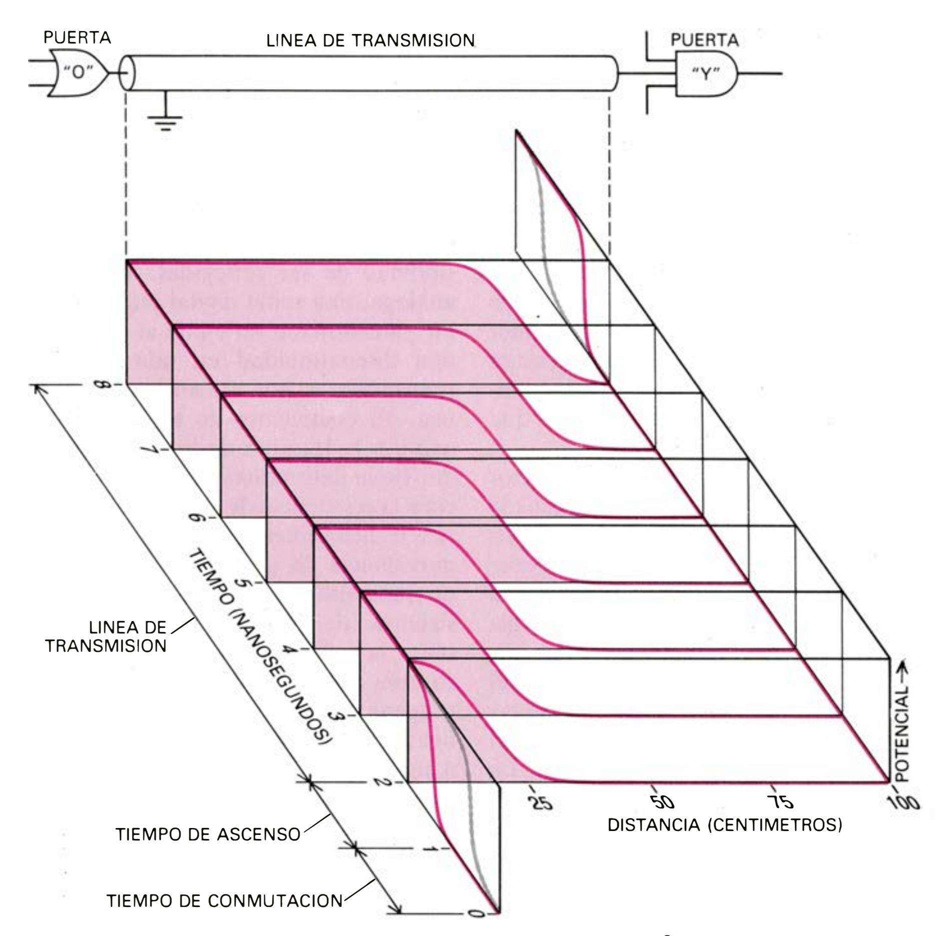
Las pastillas de mayor capacidad de recuento son las que constituyen las memorias de acceso aleatorio (RAM), cuya función consiste en almacenar información. Las unidades de memoria constituidas por semiconductores vieron la luz en 1971 y tenían 128 elementos; cada uno de estos elementos era capaz de almacenar un bit de información (el bit es un dígito binario). En la actualidad se fabrican pastillas de memoria cuya capacidad es de 256.000 bits.

Para los diseñadores de empaquetamientos, las pastillas lógicas del procesador central suponen un reto mayor que las pastillas de memoria. En general, las pastillas lógicas disipan más potencia y, por tanto, se calientan más; estas pastillas requieren también más contactos eléctricos para la comunicación de señales. De forma análoga, una pastilla basada en transistores bipolares consume más potencia que otra con funciones equivalentes constituida por transistores de efecto de campo. Conocidos todos estos hechos, a nadie le extrañará que el diseño del empaquetamiento en el procesador central de un ordenador de alta velocidad sea sumamente delicado.

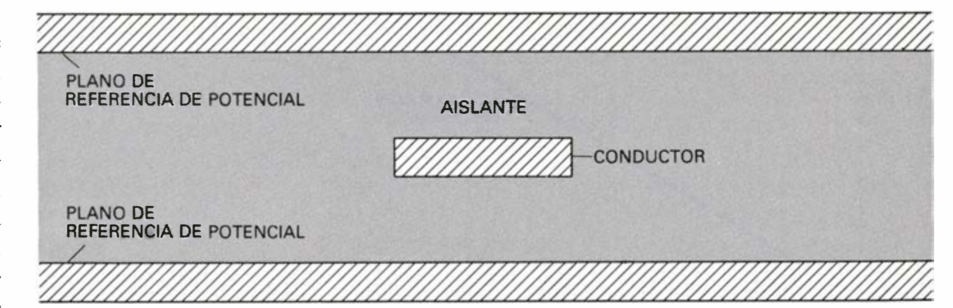
El empaquetamiento se inicia donde la pastilla concluye: en los terminales metálicos de la superficie de la pastilla que la conectan con los conductores externos. La longitud de estos conductores es una de las preocupaciones principales de los diseñadores de empaquetamientos.

En el análisis de muchos circuitos eléctricos se suele suponer que, al aplicar un potencial en el extremo de un conductor, dicho voltaje aparece simultáneamente en cualquier punto del recorrido. De hecho, la velocidad con que se transmite una señal de voltaje a lo largo de un conductor es finita; esta velocidad viene determinada por una propiedad del aislante que rodea al conductor, conocida con el nombre de constante dieléctrica relativa. Si el aislante es el aire (o el vacío), su constante dieléctrica relativa vale la unidad y la señal avanza por el conductor con la misma velocidad con que lo hace la luz en el espacio libre, es decir, una velocidad del orden de 30 centímetros por nanosegundo, utilizando unas unidades adecuadas para el objetivo de este análisis. Para otros aislantes, la constante dieléctrica resulta ser mayor, y dicha velocidad se reduce en un factor proporcional a la raíz cuadrada de la constante dieléctrica.

En el caso de una placa de fibra de vidrio del tipo de las que se utilizan en los circuitos impresos, la constante dieléctrica vale aproximadamente 4 y, por consiguiente, la velocidad de propagación se reduce en un factor de dos; en otras palabras, las señales se mueven a lo largo de los conductores incluidos en dichas placas con una velocidad del orden de 15 centímetros por nanosegundo. Dado que las señales pueden verse obligadas a recorrer más de 15 centímetros al pasar de una pastilla a otra, los retrasos en la propagación pueden superar el nanosegundo. En los dispositivos digitales lentos, los retrasos de este orden de magnitud carecen de importancia, dado que los retardos en la conmutación de las puertas lógicas se miden en decenas o centenares de nanosegundos. Sin embargo, en un ordenador en el que los tiempos de conmutación de los dispositivos que lo integran son del orden de un nanosegundo, los retrasos en la propagación de una señal contribuyen de forma significativa al valor de la velocidad global de las correspondientes operaciones. Por este motivo, la reducción de las longitudes de los conductores a su mínima expresión y el aumento de la densidad de los circuitos en la mayor cuantía posible



3. EN VIRTUD DEL RETRASO EN LA PROPAGACION DE LAS SEÑALES se limita la velocidad máxima con que trabajan los ordenadores digitales. Este retraso tiene tres componentes: el tiempo de ascenso de un potencial aplicado a una puerta lógica, el tiempo de conmutación de la propia puerta y el tiempo de transmisión necesario para que la señal alcance la siguiente puerta lógica. Cuando una señal pasa de una pastilla a otra, el retraso en la transmisión, que viene determinado por la tecnología de empaquetamiento utilizada, suele ser el mayor de los tres mencionados. En este caso, tanto el tiempo de ascenso como el tiempo de conmutación son del orden de un nanosegundo; sin embargo, la transmisión de una señal a lo largo de una distancia del orden de un metro requiere unos seis nanosegundos. La señal se propaga como una onda electromagnética en una línea de transmisión; aquí se ha representado esta onda mediante una gráfica de la diferencia de potencial en función del tiempo y de la distancia.



4. LA LINEA DE TRANSMISION consiste en un conductor rodeado por un aislante y colocado entre dos planos conductores, a modo de sandwich. Las características eléctricas de la línea dependen de las dimensiones y de las propiedades físicas de los elementos que la componen. En este sentido, la velocidad de una onda que se propaga por esta línea viene determinada por la constante dieléctrica del aislante (*centro*). Los planos conductores paralelos reducen el acoplamiento entre las líneas de las capas adyacentes.

son factores de obvio interés en el diseño de empaquetamientos.

Cuando importan los retardos en la propagación, los conductores que transportan una determinada señal no pueden considerarse simples conductores, sino que deben ser tratados como líneas de transmisión. Una señal se puede representar como una onda que se propaga a través de una línea de transmisión; el voltaje en cualquier punto a lo largo del conductor depende de la distancia que lo separa de la fuente y del tiempo transcurrido desde que se emitió la señal.

La resistencia eléctrica del conductor no es la única propiedad que afecta a la propagación de una señal en una línea de transmisión. Hemos de conocer también su inductancia, una cualidad que determina la cantidad de energía almacenada en el campo magnético originado por la corriente que atraviesa el conductor, y la capacitancia, que se relaciona con la energía almacenada en el correspondiente campo eléctrico. La inductancia y la capacitancia del sistema en cuestión dependen de la geometría de la línea de transmisión y de las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales que la constituyen; en su conjunto, todos estos factores establecen la impedancia de la línea. En una línea de transmisión de baja resistencia, la impedancia viene dada por la raíz cuadrada de la relación entre la inductancia por unidad de longitud y la capacitancia por unidad de longitud. La impedancia se mide en ohm, unidad que se utiliza al medir la resistencia de un conductor, pero sus efectos sobre la propagación de una señal son más complicados que los de la resistencia sobre una corriente continua.

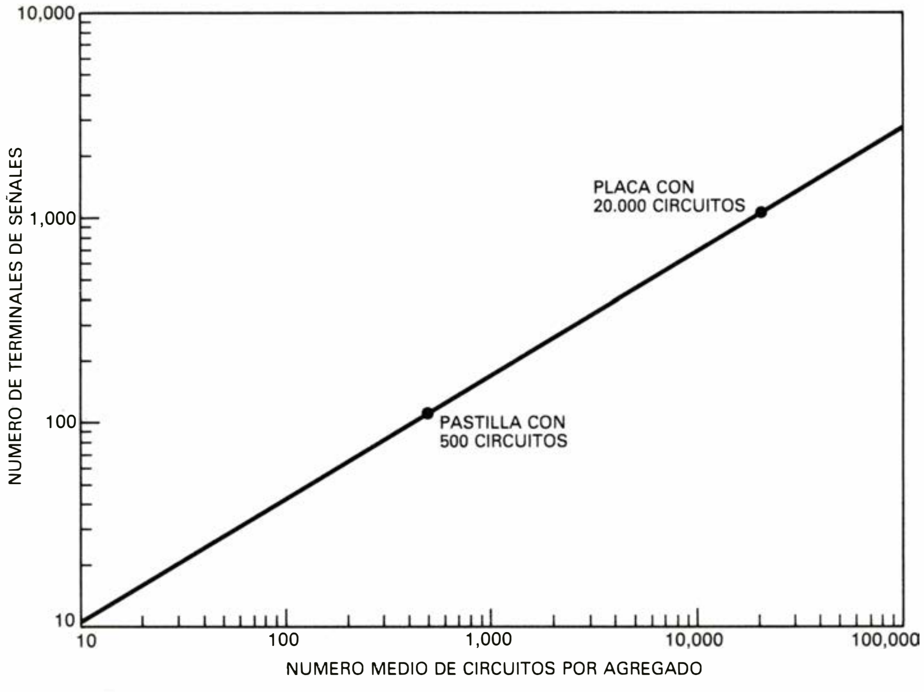
Una de las características fundamentales de todas las ondas es su posibilidad de ser reflejadas. De forma análoga, una señal digital puede resultar parcialmente reflejada al encontrar una discontinuidad en una línea de transmisión o por el extremo de la línea. El coeficiente de reflexión, que expresa la fracción de la señal reflejada, viene determinado por la impedancia y la resistencia de carga que caracteriza a dicha línea. Supongamos que la impedancia de una determinada línea de transmisión sea de 100 ohm. Si la resistencia de carga es también de 100 ohm, la señal quedará totalmente absorbida por la carga y no se reflejará ninguna fracción de la misma en la línea; estas condiciones corresponderían a una situación ideal. Sin embargo, si la resistencia de carga fuera de 200 ohm, se reflejaría un tercio de la señal y se sumaría a la señal inicial existente en la línea. Una resistencia de carga de 50 ohm proporcionaría también un coeficiente de reflexión de 1/3, pero en este caso la señal reflejada se restaría de la inicial. De todo cuanto estamos exponiendo se desprende la necesidad de controlar tales reflexiones, si pretendemos evitar los errores de conmutación.

Las reflexiones son tan sólo algunas de las formas en que el diseño de un empaquetamiento puede modificar una señal o inyectar "ruido" en un circuito. Por ejemplo, dos conductores adyacentes se pueden acoplar mediante sus inductancias y capacitancias respectivas, de suerte que la señal enviada por una de las líneas aparezca también por la otra. Este "cruce de conversaciones" debe evitarse si se ha de predecir el comportamiento del sistema.

En los empaquetamientos de alta calidad, el control de las características de las líneas de transmisión se basa en la separación de los diferentes conductores de la señal en varias capas diferenciadas mediante una serie de láminas conductoras, conocidas con el nombre de planos de referencia del potencial. Estos planos de referencia pueden proporcionar también un camino para las corrientes de retorno. Cada plano se encuentra sometido a un potencial eléctrico uniforme, que puede ser igual a cero volt (es decir, el voltaje de tierra) o a alguno de los potenciales suministrados a las pastillas o a otros componentes del circuito. (De aquí que dichos planos se puedan utilizar también en la distribución de potencia). Una línea de conducción de señales incluida en una placa aislante que, a su vez, está situada en forma de sandwich entre dos de dichos planos de referencia, constituye una línea de transmisión cuyas propiedades pueden calcularse. La existencia de estos planos proporciona una impedancia uniforme y bien definida a las líneas de transmisión y evita los cruces entre las líneas situadas en capas adyacentes.

El diseño de una línea de transmisión se inicia con la especificación de su resistencia ante una corriente continua. Esta resistencia debe ser pequeña en comparación con la resistencia de carga; en caso contrario, el voltaje de entrada resultará fuertemente atenuado cuando alcance el extremo final de la línea. La resistencia por unidad de longitud viene determinada por la resistividad del material y por la sección transversal del conductor; una vez se ha elegido el material, tan sólo la segunda de estas cualidades puede ser alterada por parte del diseñador. En el caso de los circuitos impresos y de otros elementos de conducción fabricados mediante técnicas análogas, la sección transversal del conductor tiene la forma de un rectángulo muy achatado.

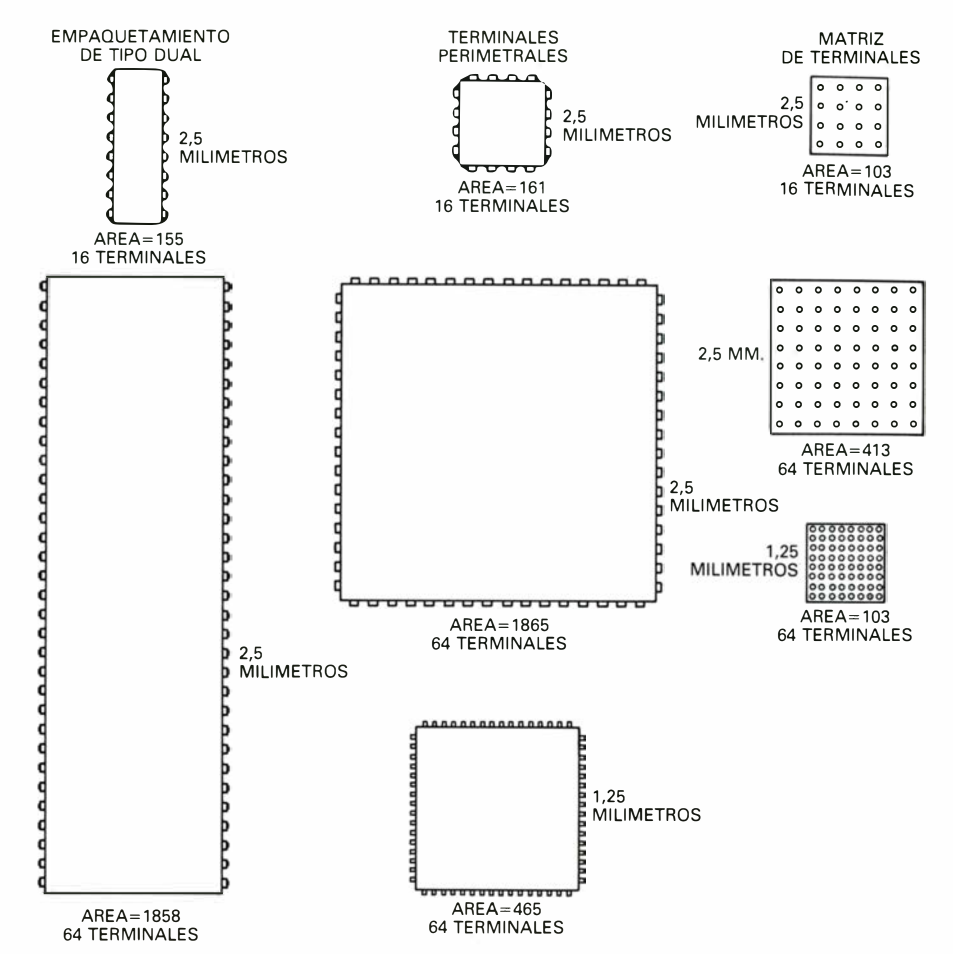
Una vez fijadas las dimensiones del conductor, la impedancia de la correspondiente línea viene determinada por dos nuevos factores: la constante dieléctrica del medio aislante y la distancia entre los planos de referencia de voltaje. En consecuencia, para un material



5. NUMERO DE TERMINALES necesarios para comunicaciones en un conjunto de circuitos lógicos, evaluado con la ayuda de una relación empírica conocida como regla de Rent. El conjunto de circuitos lógicos *C* que existen en un ordenador necesita 2,5 $C^{0,61}$ terminales. Así, una pastilla con 500 circuitos necesitaría unos 110 terminales; una placa con 20.000 circuitos precisaría unos 1000 terminales.

aislante dado, se procede a ajustar la distancia entre los planos de referencia hasta alcanzar la impedancia deseada. Las características del diseño dependen de muchos factores diferentes, entre los que se cuentan las propiedades eléctricas de las pastillas que constituyen el sistema, las dimensiones y otras especificaciones del empaquetamiento y la potencia disponible para alimentar las líneas de transmisión. La impedancia suele situarse en valores comprendidos entre los 50 y 100 ohm.

Un conductor colocado entre dos planos de referencia constituye tan sólo una aproximación a una línea de transmisión real. En la práctica, la línea de conexión entre dos pastillas puede seguir un camino tortuoso, saltando de una capa a otra. En las transiciones entre los diferentes niveles del empaquetamiento –tales como las que se producen desde una pastilla al portador o desde una placa al armazón– las propiedades eléctricas de los conductores difieren considerablemente de las ideales. Como se indicó antes, estas discontinuidades producen reflexiones y ciertos retardos adicionales en la respuesta de los sistemas. Esos retardos, proporcionales a las inductancias y capacitancias respectivas, han de sumarse al retardo de propagación propio del circuito a fin de determinar el retardo total que caracteriza a un sistema de empaquetamiento concreto.



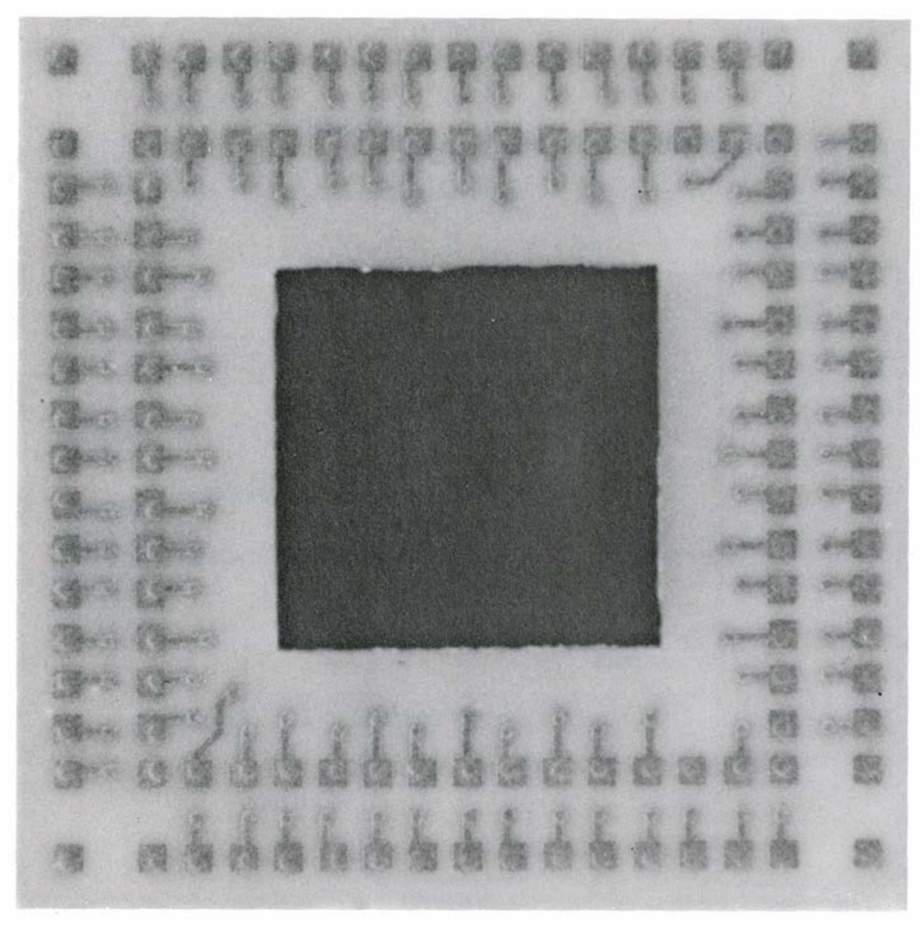
6. HUELLA DEL PORTADOR DE UNA PASTILLA o superficie que ocupa en una placa. Dicha impronta depende del espaciado y de la disposición de los correspondientes terminales. El empaquetamiento del tipo dual, con dos filas de conexiones separadas entre sí 2,5 milímetros, es el adecuado para una pastilla con 16 terminales, pero no para otra de 64 terminales. Un empaquetamiento cuadrado con los terminales en la periferia no supone un ahorro en el espacio, si la distancia entre dichos terminales es del orden de 2,5 milímetros; ocupa, sin embargo, la cuarta parte de la superficie si dicha distancia es del orden de 1,25 milímetros. En la práctica, la configuración más adecuada para un portador de pastillas es la de una red completa de terminales. Un portador de forma cuadrada con 64 terminales en red con un espaciado de 1,25 milímetros ocupa menos que un empaquetamiento del tipo dual con 16 terminales.

Procediendo de forma análoga, se puede lograr fácilmente que una línea de transmisión individual que discurra entre dos terminales aislados posea unas determinadas características. Sin embargo, la tarea real de un diseñador de empaquetamientos consiste en crear una red de caminos entrecruzados capaces de conectar entre sí miles de terminales diferentes. La complejidad topológica de la red resultante es enorme.

El número de terminales que es necesario conectar en un empaquetamiento a cualquier nivel jerárquico se puede evaluar fácilmente mediante una relación empírica conocida como regla de Rent, desarrollada en 1960 por E. F. Rent, de la International Business Machines Corporation. Esta relación se puede aplicar indistintamente a las pastillas, a los módulos de pastillas múltiples, a las placas y a los armazones. En todos los casos, la regla de Rent proporciona el número aproximado de terminales de un sistema en función del número de circuitos lógicos, *C*. Tomando como base los datos obtenidos en el análisis de grandes sistemas de proceso de datos, la regla de Rent nos permite predecir que el número medio de terminales vendrá dado por la relación $2{,}5\ C^{0{,}61}$. Por ejemplo, el número de terminales necesarios para soportar 100 circuitos es del orden de 40 y el número necesario para 1000 circuitos resulta ser de 170.

Sin embargo, en relación con la aplicación de la regla de Rent, hay que destacar la existencia de ciertas limitaciones. En primer lugar, esta regla sólo puede aplicarse a los elementos lógicos de un sistema de proceso de datos; las unidades de memoria necesitan muchos menos terminales. En segundo lugar, hay que tener en cuenta que cada conjunto de circuitos es, en realidad, un pequeño subconjunto "al azar" de todo el complejo lógico. Dado que cada uno de estos conjuntos forma una unidad funcional completa de un ordenador, se precisan pocos terminales. En tercer lugar, se supone que la información que se transfiere entre los diferentes empaquetamientos no está especialmente codificada para su transmisión en serie; esta situación reduce el número de terminales necesarios, aunque esto se consigue sólo a costa de una mayor lentitud en la operación. Los conjuntos de circuitos lógicos utilizados en los ordenadores que estamos considerando aquí cumplen todas estas condiciones.

Vamos a referirnos ahora al empaquetamiento de una unidad funcional integrada por un total de 10.000 circuitos lógicos y constituida por un determinado conjunto de pastillas, cada una de las cuales contiene como máximo 25 circuitos. Las pastillas están alojadas en unos portadores dotados de 14 terminales y montados en unas placas con 100 terminales. En principio, se podría pensar que una unidad con 10.000 circuitos estaría constituida por 400 pastillas con 25 circuitos cada una. Sin embargo, la regla de Rent demuestra que un empaquetamiento con 14 terminales tan sólo puede albergar, por término medio, 17 circuitos; por consiguiente, el número de pastillas necesarias ven-



7. CON EL PORTADOR DE VARIAS PASTILLAS se reduce la distancia media entre todas ellas, gracias a lo cual el retraso de transmisión medio se hace menor. En esta figura se representa una pastilla montada sobre una placa cerámica de capas múltiples; esta placa puede alojar unas 100 pastillas. Tanto la potencia como las señales se transmiten a través de los conductores incluidos en la placa. La doble fila de terminales que rodea a la pastilla permite el acceso hacia las líneas de señales, facilitándose de esta forma la comprobación del conjunto y modificando, cuando sea necesario, las oportunas conexiones.

drá dado por el resultado de dividir 10.000 entre 17, es decir, 588. (Obsérvese que casi la tercera parte de la capacidad de las pastillas se mantiene desocupada, lo cual sugiere que un portador de pastillas con más de 14 terminales rendiría más.)

Una segunda aplicación de la regla de Rent pone de manifiesto que los 100 terminales que existen en una placa proporcionan una capacidad de comunicaciones suficiente para 424 circuitos. En consecuencia, el número de placas necesarias se obtiene dividiendo 10.000 entre 424, que da un total de 24; cada placa aloja, por término medio, unos 25 portadores de pastillas.

La regla de Rent permite tan sólo hacer una estimación del número de empaquetamientos necesarios dentro de un determinado nivel jerárquico; el tamaño real de una placa se determina a partir de los detalles del diseño físico. El resultado depende, sobre todo, del empaquetamiento al más bajo nivel, que generalmente está constituido por el portador de una pastilla individual. Entre los factores a tomar en consideración en el diseño de dichas placas recordaremos la configuración de los terminales en el portador, la densidad máxima de los recorridos de las señales, el comportamiento eléctrico exigido, las necesidades de potencia de las pastillas y la capacidad de enfriamiento del diseño general del empaquetamiento.

En su forma más sencilla, el portador de una pastilla es un transformador espacial. El portador actúa de puente entre los contactos situados en la superficie de la pastilla, pequeños y poco espaciados entre sí, y la red de conductores de mayor tamaño situada en la placa. Uno de los portadores de pastillas más utilizados es el de tipo dual; está constituido por un recinto rectangular de plástico o cerámica provisto de una serie de terminales situados a lo largo de cada uno de sus dos lados más largos. Los terminales tienen una separación entre centros de 2,5 milímetros y se introducen en otros tantos agujeros practicados en la placa del circuito impreso. El empaquetamiento de tipo dual favorece un aprovechamiento eficaz del espacio disponible en las placas que soportan las pastillas cuando el número de terminales es relativamente pequeño (del orden de 10 o 20), pero su manejo se hace muy difícil al aumentar dicho número. Para una pastilla con 64 terminales, la longitud del empaquetamiento es mucho mayor y su anchura debe también crecer de forma apreciable para proporcionar el espacio suficiente que permita la conexión de los terminales de la pastilla a las líneas de conducción externas.

La norma industrial experimenta hoy un desplazamiento de los empaquetamientos de tipo dual a los portadores de pastillas de forma cuadrada, provistos de terminales en sus cuatro lados. Los terminales, situados en centros de 1,25 milímetros, se sueldan a los correspondientes terminales en la superficie de la placa del circuito impreso. Este diseño reduce de forma significativa las exigencias de espacio. Un portador de pastilla cuadrado con 64 terminales periféricos ocupa una superficie cuatro veces menor que un empaquetamiento análogo de tipo dual.

La configuración más densa de los portadores de pastillas se obtiene disponiendo sus terminales en forma de matriz. Así, por ejemplo, sesenta y cuatro terminales dispuestos en forma de una matriz de ocho por ocho sobre centros de 1,25 milímetros ocupan menos de la cuarta parte del espacio que se precisaría si este mismo número de terminales estuviera montado de forma perimetral. Las ventajas de la estructura matricial aumentan con el número de terminales. Ahora bien, la conexión de un elevado número de terminales exige emplear una placa de circuito impreso mucho más compleja y, por consiguiente, mucho más cara.

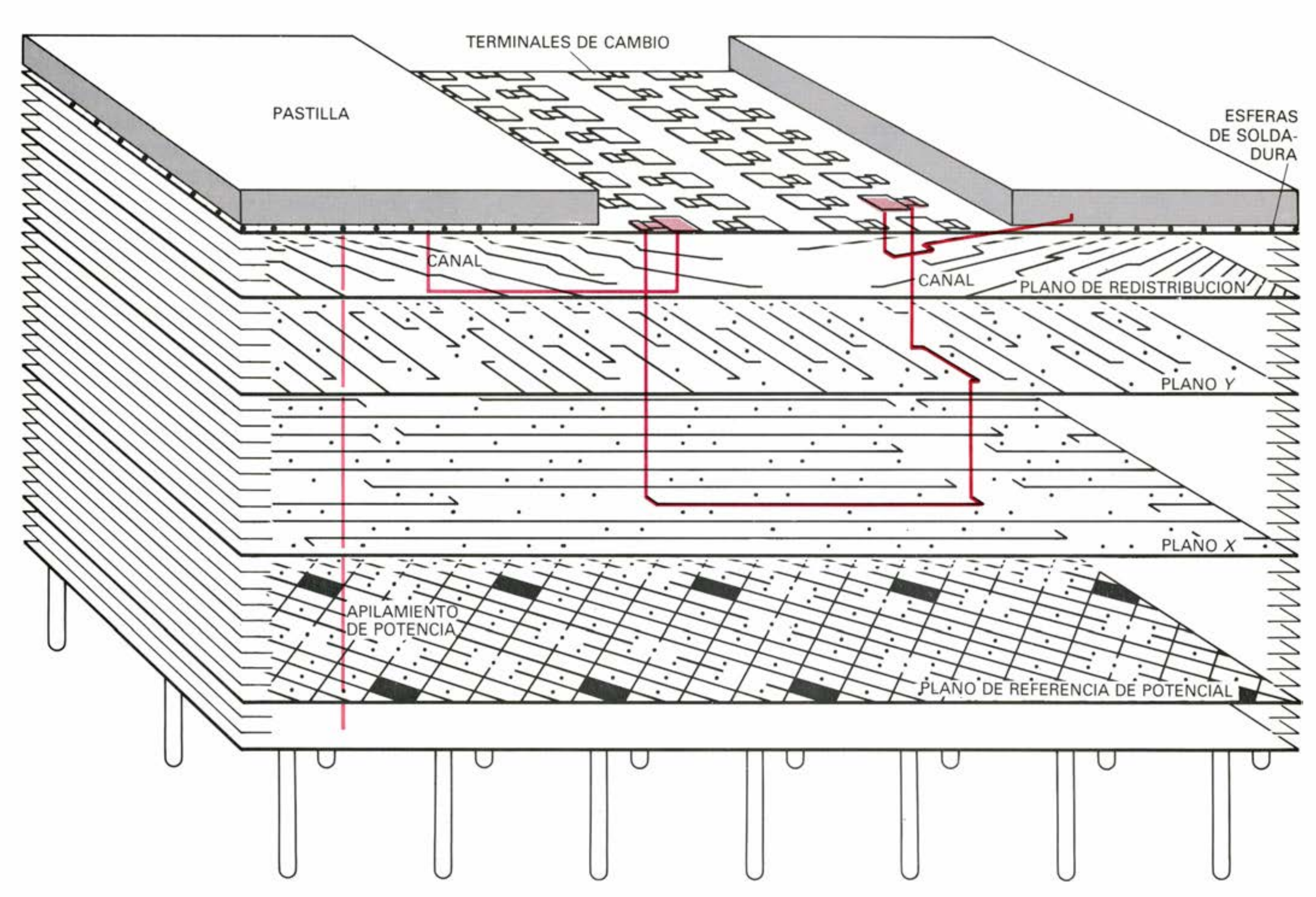
A medida que aumenta el número de terminales por pastilla y el número de éstas por unidad de área, la capacidad de la placa o del módulo multipastilla para establecer interconexiones se convierte en el principal factor limitante. Las placas de circuito impreso más sencillas sólo disponen de una capa de líneas de señal. Por consiguiente, cuando se procede a diseñar el correspondiente cableado se debe prestar la mayor atención posible a este requisito obvio: no se puede permitir que dos conductores se crucen. Las capas múltiples de cableado eliminan este problema, especialmente en el caso de que todos los conductores de una capa dada estén orientados a lo largo de uno de los dos ejes principales, bien sea el x o el y. Por otro lado, en una de estas placas de capas múltiples se necesita disponer de algún espacio libre para albergar unos canales capaces de conectar entre sí a las diferentes placas en un

sentido vertical. Una señal que pretendiera cruzar estas placas en sentido diagonal se dirigiría a través de uno de estos canales hasta un plano de tipo *x*, en el que una línea adecuada la conduciría en una dirección paralela a uno de los bordes de la placa; más tarde, a través de otro canal, la señal llegaría hasta un plano de tipo *y*, en el que se movería a lo largo de una línea perpendicular a la anterior y, finalmente, atravesando un tercer canal, la señal arribaría a la superficie de la placa a la que se pretendía que llegara.

El diseño de una placa de capas múltiples se rige por ciertas reglas que especifican las dimensiones de los conductores y los lugares en que estos conductores se pueden colocar. Por ejemplo, los canales a los que nos acabamos de referir suelen estar dispuestos en forma de red; aunque no todas las intersecciones de las líneas de la red disponen de uno de estos canales, todos los canales están situados en dichas intersecciones. Las líneas por las que se transmite una señal discurren entre las filas de canales. La inserción de conductores múltiples entre canales adyacentes puede aumentar la densidad general del cableado, pero esta inserción complica considerablemente el diseño de la correspondiente placa: el acceso de un conductor a un determinado canal puede resultar bloqueado por otro conductor.

Las reglas del diseño establecen la capacidad máxima de cableado en relación con una tecnología de empaquetamiento determinada. La longitud máxima de cableado por unidad de superficie de placa viene dada por el producto del número de capas de que dispone dicha placa por el número de líneas de señal existentes entre dos canales adyacentes dividido por el espaciado de la red que forman los canales. Por ejemplo, una placa que disponga de dos planos de señal y de dos conductores entre los canales y cuya separación de canales sea de 2,5 milímetros tendrá una capacidad de cableado de 16 centímetros por centímetro cuadrado. Tanto la capacidad de cableado como el rendimiento dependen estrechamente del tamaño de los canales y de la disponibilidad de canales de comunicación entre los diferentes planos de señal.

Una tecnología que empaquetara muchas pastillas en un pequeño volumen carecería de valor si no consiguiera extraer del sistema el calor generado por las pastillas. La propiedad que determina la capacidad de enfriamiento de uno de los módulos portadores de pastillas es su resistencia térmica, una propiedad muy similar a la resistencia eléctrica. De acuerdo con la ley de Ohm, la resistencia entre dos puntos de un circuito eléctrico es igual a la diferencia de potencial entre dichos puntos dividida por la corriente que fluye entre los mismos. De forma análoga, la resistencia térmica de un empaquetamiento viene dada por la diferencia de temperaturas entre la fuente térmica (la pastilla) y el último sumidero (el aire ambiente) dividida por el flujo de calor que atraviesa el empaquetamiento.



8. PLACA CERAMICA DE CAPAS MULTIPLES, capaz de alojar hasta 320 centímetros de cables por centímetro cuadrado de superficie. Se esquematiza aquí una pequeña región de una de estas placas con la sección transversal muy aumentada. El recorrido de una señal típica que procede de una pastilla discurre por un "canal" que atraviesa las diferentes capas de la estructura. Un conductor situado en una capa de cinco similares transporta la señal hasta otro canal, que la devuelve a la superficie a través de un conductor de retorno. A continuación, la señal cruza un puente metálico situado en dicha superficie y llega hasta un tercer canal, que la transporta hasta un plano de señales en el interior de la placa. Un conductor orientado a lo largo del eje *x* la porta hasta un nuevo canal para llegar a otro conductor orientado según el eje *y*; un último canal la devuelve a la superficie, hasta el emplazamiento de otra pastilla, con lo que se completa este recorrido. Los recorridos de algunas señales llegan hasta los terminales situados en la parte inferior de la placa; dichos terminales están conectados con otros módulos de varias pastillas. La potencia se distribuye a lo largo de tres planos situados en la parte inferior de la placa. El esquema de conexiones se modifica cortando una de las uniones de uno de los conductores de retorno y conectando allí un nuevo conductor.

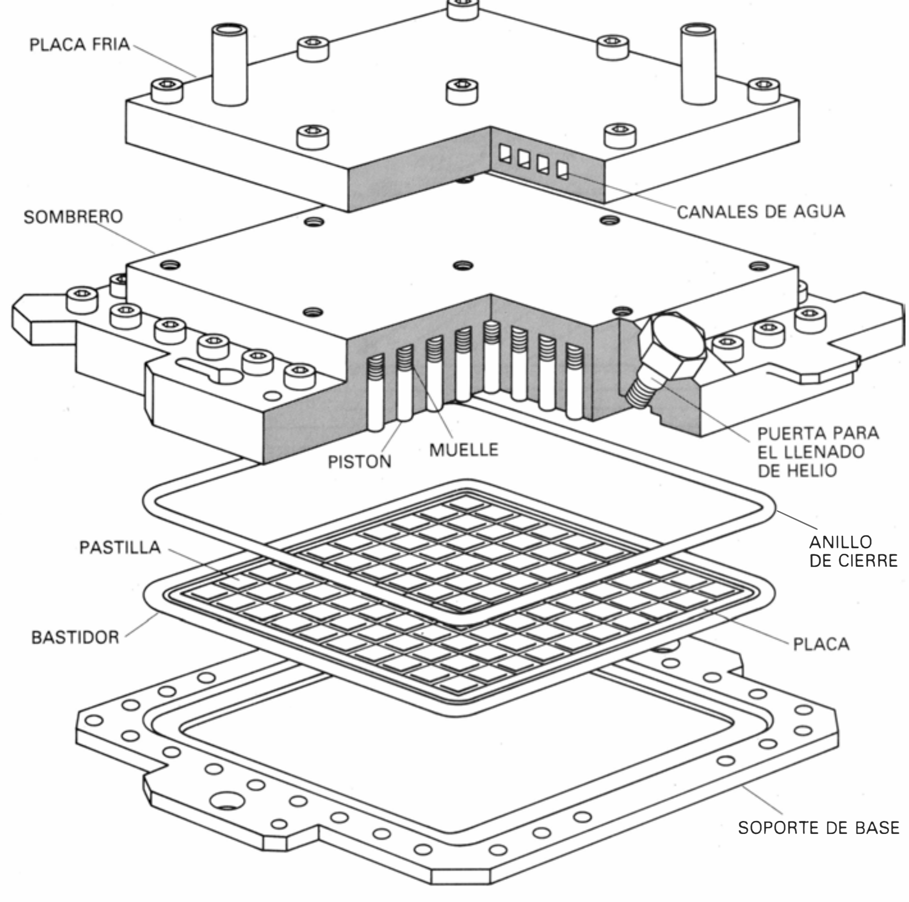
Cuando el sistema se halla en estado estacionario, dicho flujo de calor es igual a la potencia disipada por la pastilla. La resistencia térmica se puede expresar en grados Celsius por watt.

El recorrido del calor desde la pastilla hasta el aire se puede considerar dividido en dos partes. En primer lugar, el calor se transmite por conducción desde las uniones del semiconductor –las zonas internas de la pastilla en las que se genera la mayor cantidad de calor– hasta la superficie del empaquetamiento. La resistencia térmica de esta parte del recorrido, llamada resistencia interna, depende fundamentalmente de la geometría del portador de la pastilla y de la conductividad térmica de los materiales que lo constituyen. En segundo lugar, el calor se extrae desde el propio empaquetamiento, en la mayoría de los casos utilizando una corriente de aire; el mecanismo de transferencia puede ser una convección libre o forzada. La resistencia térmica externa es una función compleja de muchos factores, entre los que se incluyen la superficie del sistema y su emisividad térmica, así como la velocidad y turbulencia de la corriente de aire citada anteriormente.

La resistencia térmica global de un empaquetamiento de plástico de tipo dual sometido a una corriente de aire es del orden de 50 grados C por watt. En consecuencia, una pastilla que disipara 0,5 watt sufriría un aumento de temperatura del orden de 25 grados. La resistencia interna se puede reducir sustituyendo el empaquetamiento plástico por otro cerámico, dado que la conductividad térmica de este último material es mayor, o también aumentando la superficie de la unión entre la pastilla y el portador. Estas medidas pueden reducir la resistencia térmica a la mitad y, por tanto, duplicar la capacidad de potencia. La resistencia externa se reduce también por adición de un radiador de calor que aumente la superficie efectiva del empaquetamiento o incrementando la velocidad del aire de refrigeración; en cualquier caso, resulta muy difícil conseguir una reducción de la resistencia global en un valor superior a otro factor dos.

En un empaquetamiento con una resistencia térmica dada, la potencia disipada máxima depende de la diferencia de temperaturas de que se dispone a efectos de enfriamiento. Aunque algunos dispositivos de silicio funcionan por encima de los 150 grados Celsius, la temperatura operativa máxima de los circuitos digitales no superará los 85 grados, si se quiere asegurar la fiabilidad y la uniformidad de las propiedades eléctricas de las pastillas. La temperatura del aire de enfriamiento puede llegar a alcanzar los 30 grados; el aire se calienta unos 10 o 15 grados cuando atraviesa el empaquetamiento. De aquí se deduce que la diferencia de temperaturas máxima resulta inferior a los 50 grados. Todos estos datos implican que la capacidad de manejo de potencia de un empaquetamiento cerámico del tipo dual sea a lo sumo del orden de dos watt. En general, el flujo de calor máximo con enfriamiento por aire es de unos dos watt por centímetro cuadrado en el nivel de la pastilla y de unos 0,5 watt por centímetro cuadrado en el nivel del módulo. (Estos valores pueden aumentar algo utilizando radiadores de calor especiales y una corriente de aire frío de alta velocidad.) Los límites anteriores suponen una restricción importante sobre la potencia y la densidad del circuito y, por ende, sobre su funcionamiento.

Algunos ingenieros de ordenadores rápidos han investigado varias alternativas a la tecnología del empaquetamiento basada en los portadores de pastillas enfriados por aire. Me detendré en una de las técnicas más avanzadas en este campo, desarrollada para una nueva serie de ordenadores por un grupo de científicos e ingenieros de la empresa IBM en sus instalaciones de East Fishkill, Endicott y Poughkeepsie, Nueva York, así como en las de Sindelfingen, República Federal de Alemania. El diseño se proponía reducir el número de interconexiones entre los diferentes niveles del empaquetamiento y acortar la longitud total del cableado. La culminación de estos objetivos proporciona tres ventajas potenciales: mayor velocidad, menor coste y mayor fiabilidad. El empaquetamiento resultante cuenta con dos elementos principales: una base cerámica de capa múltiple en la que se montan las pastillas y a través de la cual se realizan todas las conexiones y un módulo de ensamblaje que proporciona una vía térmica directa desde la parte posterior de las pasti-



9. ESTE MODULO DE CONDUCCION TERMICA aloja una placa con capas múltiples y refrigera las 100 o más pastillas que hay montadas en su superficie. La placa en cuestión está situada entre un soporte de base y una pieza en forma de sombrero equipada con unos pistones metálicos unidos a unos muelles. Cada pistón ejerce una presión sobre la parte posterior de una pastilla, conduciendo el calor hasta una placa fría que está en contacto con la parte superior de la pieza en forma de sombrero. A su vez, la placa de refrigeración transfiere el calor hasta una corriente de agua fría que se hace circular a través de una serie de canales que la atraviesan. La capacidad de este módulo para disipar calor se refuerza rellenando su volumen interno con helio, habida cuenta de que la conductividad térmica de este gas es mayor que la del aire. Los módulos de conducción térmica permiten manejar potencias del orden de los 300 watt.

llas hasta un radiador de calor enfriado por agua.

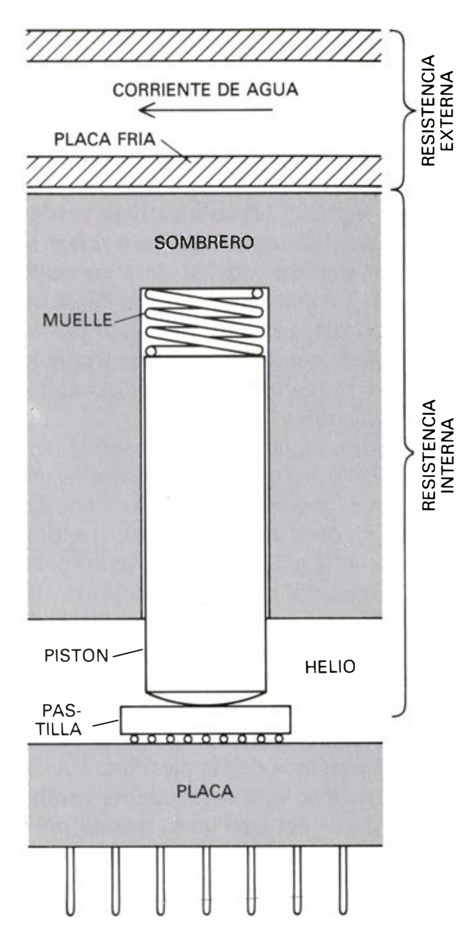
En la base cerámica se incluye una red de conductores muy compleja. Esta pieza tiene la forma de una baldosa cuadrada de 90 milímetros de lado y 5 milímetros de grosor. En la superficie delantera se sitúan entre 100 y 133 pastillas de alta velocidad con más de 12.000 terminales. En la superficie trasera hay un total de 1800 terminales más, a través de los cuales se suministra la potencia a las pastillas y se transportan las señales al siguiente nivel jerárquico del empaquetamiento (en ambos sentidos). Tanto los terminales de las pastillas como los terminales del módulo están dispuestos en forma de matrices bidimensionales con el fin de que el espacio ocupado sea el menor posible. La base que estamos describiendo dispone de 33 capas de conductores interconectados entre sí mediante más de 350.000 canales.

Dieciséis de estas capas son planos de cableado de tipo *x* o de tipo *y*. Las reglas del diseño de estas capas permiten que los canales de conexión estén situados en los vértices de un retículo cuyo espaciado es del orden de 0,5 milímetros. Para eliminar la posibilidad de conflicto en el acceso a dichos canales tan sólo se permite el paso de una línea de señal entre dos canales adyacentes. Por consiguiente, las 16 capas de señales tienen una capacidad de cableado máxima de 320 centímetros por centímetro cuadrado de sustrato. Una placa típica es capaz de alojar un total de 130 metros de conductores. Entre cada dos planos *x* e *y* se inserta un plano de referencia de potencial, con el fin de controlar la impedancia de las líneas de señales. La impedancia característica es de 55 ohm.

Las cinco primeras capas de la placa tienen un mayor número de canales. En este caso, el espaciado del correspondiente reticulado es del orden de 0,25 milímetros, lo cual permite conectar hasta un total de 120 terminales por pastilla. Estas capas se utilizan para redistribuir las líneas de señales (96 por pastilla) desde los terminales de las pastillas hasta un conjunto de terminales que rodean el oportuno emplazamiento. Las líneas de señales retornan desde aquí hasta el interior de la placa. Los terminales superficiales permiten la comprobación del módulo sin sacar las pastillas de sus emplazamientos. Por otra parte, si se pretende introducir algún cambio en el cableado, se puede cortar un pequeño puente en la superficie de la placa con el objeto de aislar cualquier línea de señal del cableado interno. A continuación, se puede hacer una nueva conexión uniendo un conductor delgado al terminal metálico e introduciéndolo en los canales situados entre las pastillas. La posibilidad de llevar a cabo estos cambios adquiere una especial importancia durante el desarrollo de un nuevo producto. Existen otros métodos para reemplazar las pastillas cuando lo exige el diseño o el fallo de un componente.

La potencia se distribuye mediante los tres últimos planos de la placa; dos de ellos transportan los voltajes requeridos por las pastillas, en tanto que el tercero está al potencial de tierra. Los propios planos están alimentados en paralelo a través de un conjunto de terminales distribuidos uniformemente a lo largo de su superficie; se usan para ello 500 de los 1800 terminales disponibles. La corriente pasa directamente desde dichas placas hasta las pastillas a través de los oportunos canales verticales. Las placas han sido diseñadas de forma tal que pueda llegar hasta un máximo de 4 watt a cada pastilla, aunque no todas las pastillas extraen el máximo de corriente. El consumo total de potencia del módulo está limitado a 300 watt, lo que representa un promedio del orden de 3 watt por pastilla. La pérdida de voltaje debida a la resistencia del empaquetamiento es inferior a los 15 milivolt.

Como es natural, ha sido necesario adoptar ciertos compromisos relativos al diseño y a los materiales utilizados en esta técnica de empaquetamiento. El componente principal de la placa es el óxido de aluminio, un material cerámico cuya elección está motivada por sus excelentes propiedades mecánicas y su resistencia ante los diferentes procesos químicos y térmicos a los que se le somete durante el proceso de fabricación del módulo. El principal inconveniente de la alúmina radica en que su constante dieléctrica es relativamente elevada (9,4). Por culpa de ello, la velocidad de propagación de las señales en el módulo es menor que cuando se utilizan circuitos impresos de fibra de vidrio. Pero ocurre que las pastillas se pueden montar directamente sobre la placas base de cerámica: la distancia media entre las pastillas es mucho menor que en el caso de utilizar la otra tecnología y, por tanto, el retardo total en la propagación resulta significativamente menor. Otro punto a considerar tiene que ver con la elección del material de los conductores incluidos en la placa. Dado que el material cerámico ha de someterse a temperaturas del orden de 1500 grados Celsius, los conductores deben fabricarse con un metal refractario; la conductividad eléctrica de otros metales es superior a la de estos materiales, pero sus puntos de fusión son demasiado bajos. (Por ejemplo, el cobre funde a 1083 grados Celsius.) El metal escogido es el molibdeno, cuya resistividad viene a triplicar la del cobre. Esta desventaja se compensa con una elevada densidad de canales, a cuyo través se suministra directamente a las pastillas corrientes eléctricas muy intensas.



10. RESISTENCIA TERMICA de un módulo. Determina el aumento máximo de temperatura que experimenta una pastilla con una disipación de potencia considerada. La resistencia del recorrido del calor desde la pastilla, a través del pistón (y de la atmósfera de helio), hasta la pieza en forma de sombrero se supone de naturaleza interna; la resistencia desde la placa fría hasta la corriente de agua se supone externa. La resistencia total del empaquetamiento se cifra en unos 11 grados Celsius por watt y por pastilla. Por consiguiente, una pastilla que disipe unos cuatro watt sufrirá un aumento de temperatura de unos 44 grados por encima de la temperatura del agua de refrigeración.

La fabricación de una placa cerámica de capas múltiples se inicia con la fundición de las diferentes capas. El material cerámico se mezcla con vidrio en polvo, un cemento orgánico y un disolvente hasta que se forma una pasta con una consistencia parecida a la de una pintura. Dicha pasta se deposita sobre una cinta de plástico en movimiento y se hace pasar bajo una cuchilla con la que se regula el espesor de la capa hasta el valor deseado. Se elimina

el disolvente en un horno de secado lento. El material resultante forma una masa compacta y flexible a la vez, semejante a una hoja de papel grueso. Al cortar esta lámina se obtienen una serie de láminas cuadradas conocidas por "hojas verdes" (el calificativo "verde" lo utilizan los ceramistas para referirse a los materiales no cocidos; en realidad, las láminas son de color blanco). En los vértices de cada lámina se practican sendos agujeros de referencia para facilitar la realización de las operaciones posteriores.

La etapa siguiente consiste en la perforación de los canales. Esta operación se lleva a cabo bajo control de un ordenador mediante una máquina perforadora de alta velocidad. Por ejemplo, en la capa superior de un módulo de 100 pastillas, el emplazamiento de cada pastilla posee una matriz idéntica de agujeros. En consecuencia, se montan cien punzones en forma de retículo con un espaciado igual al espaciado de los emplazamientos de las pastillas. En cada operación, esta herramienta produce un único agujero en la misma posición relativa en cada uno de dichos emplazamientos; a continuación se mueve ligeramente la lámina entera y se practican otros 100 orificios.

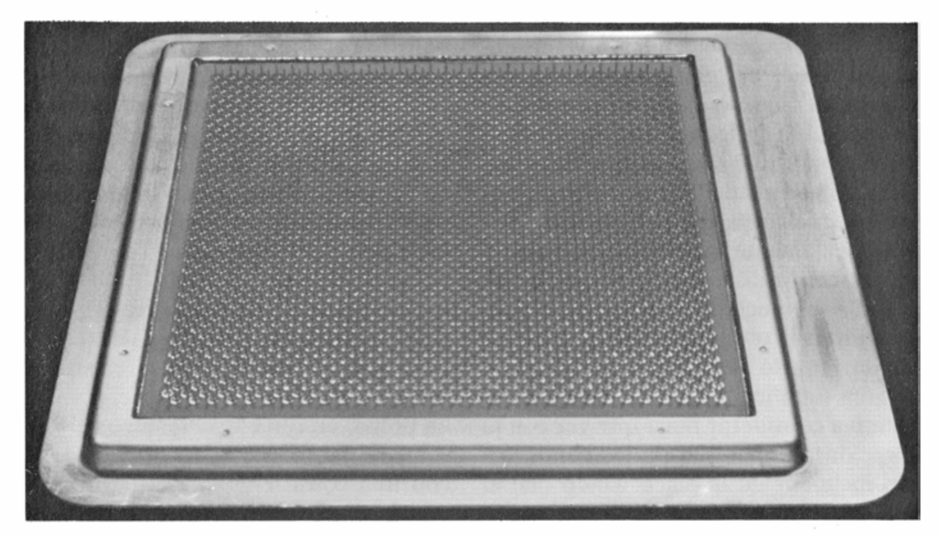
Las configuraciones metálicas se depositan sobre las "hojas verdes" en un procedimiento análogo al que utilizan las multicopistas. La pasta de molibdeno se expele a través de una plantilla metálica recortada según la forma del cableado que se desea reproducir. (Esta plantilla se obtiene automáticamente a partir de los datos de un sistema de diseño por ordenador.) La citada pasta se aplica bajo presión, de suerte que los canales que habían sido perforados anteriormente se rellenan también con ella. Las láminas metalizadas se desecan y se someten a una inspección cuidadosa. La detección de posibles grietas en las láminas individuales antes de que esas mismas láminas se combinen con otras para formar una placa base es un paso muy importante en el proceso de fabricación que estamos describiendo.

Las láminas que superan esta inspección se apilan en orden y se someten a un proceso de laminado bajo presión elevada a una temperatura de 75 grados Celsius. Dado que los canales de conexión (cuyo diámetro es de 120 micrometros) deben ser continuos de una capa a la siguiente, resulta decisivo el control de las dimensiones y de la alineación. Las "hojas verdes" se someten a un largo tratamiento térmico de tipo cíclico, en el que la temperatura máxima, de más de 1500 grados, se alcanza en una atmósfera de hidrógeno. A temperaturas inferiores a este valor, el material orgánico se descompone y se volatiliza; a temperaturas superiores, el material cerámico y el metálico se unen formando una estructura monolítica.

La velocidad del calentamiento ha de controlarse cuidadosamente. Si el aumento de la temperatura se produjera de golpe, el cemento orgánico se volatilizaría con una velocidad mayor que la velocidad de difusión superficial y la lámina se resquebrajaría. Durante el tratamiento térmico, cada una de las dimensiones de la placa se encoge en un 17 por ciento aproximadamente, lo cual supone una reducción del volumen del orden del 40 por ciento. Dadas las críticas tolerancias dimensionales del conjunto final, resulta evidente que la cuantía de esta reducción debe conocerse con gran precisión antes de iniciar el proceso. Tras el tratamiento térmico, el tamaño, la forma y la dureza de la placa son similares a las de una baldosa cerámica.

Las superficies metálicas existentes en las dos caras de la placa se recubren en primer lugar de níquel y finalmente de oro. A continuación se lleva a cabo una exhaustiva comprobación eléctrica con la ayuda de un instrumento automático que, una vez más, utiliza los datos facilitados por el sistema de diseño por ordenador para comprobar que todas las conexiones sean correctas. Esta operación se plantea con el objeto de confirmar que cada uno de los terminales de la lámina está conectado a otros terminales en la forma prevista en el diseño; por otra parte, el instrumento se asegura de que no existen conexiones incorrectas. Cuando finaliza esta comprobación, los 1800 terminales se sueldan a la superficie posterior; en la misma operación se une a la placa, también por soldadura, un marco metálico.

Los circuitos integrados se unen a la lámina base según un método desarrollado en IBM para una generación anterior de ordenadores. La operación se inicia con la evaporación de una soldadura de estaño y plomo a través de una plantilla metálica sobre los terminales de contacto existentes en la superficie de la pastilla. A continuación, la pastilla se calienta en una atmósfera inerte hasta que la soldadura se funde, de suerte que, en virtud de la tensión superficial, se forma una gotita esférica en cada terminal. Cuando esta soldadura se ha endurecido, la pastilla se coloca sobre la placa con los terminales de contacto alineados. Una vez que todas las pastillas se han colocado sobre la placa, el conjunto se calienta de nuevo hasta alcanzar el punto de fusión de las soldaduras; cada gota de soldadura adquiere la forma de una esfera truncada, conectando eléctricamente los terminales de la pastilla y de la placa, si bien lo hace manteniendo separada la pastilla de la superficie de dicha placa. Las pastillas montadas de esta manera se comprueban a través de los terminales que las rodean. Finalmente, todos los conductores superficiales necesarios se instalan utilizando una técnica de soldadura ultrasónica.



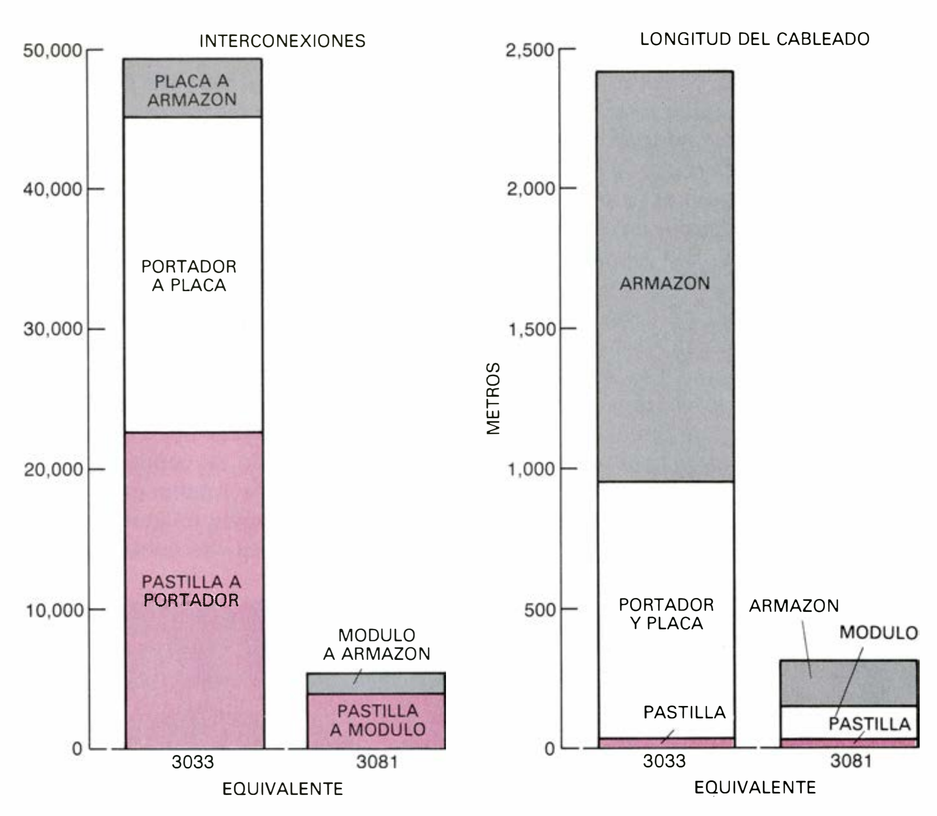
11. LECHO DE CONEXIONES situado en la parte posterior de un módulo de conducción térmica y constituido por 1800 terminales. Quinientos de estos terminales suministran potencia al módulo; el resto se considera de libre disposición para conectar a éste con otros módulos similares y demás componentes.

Las placas de cerámica de capas múltiples constituyen la base de los módulos de conducción térmica. Estos módulos poseen otros dos componentes fundamentales. El primero de ellos consiste en una pieza parecida a un

sombrero que comprime un anillo flexible cuya sección tiene forma de *C* y que, por tanto, encierra un cierto volumen interno. El segundo elemento consiste en una placa fría unida a la parte superior de la pieza anterior. En el interior de las piezas en forma de sombrero se alojan una serie de pistones de aluminio con la misma disposición que la de las pastillas montadas en la placa. Cada uno de estos pistones presiona sobre una pastilla y conduce el calor hasta la placa fría. A su vez, la placa fría se mantiene en esas condiciones mediante una corriente de agua a 24 grados Celsius que fluye a través de una red de canales internos, a una velocidad de 40 centímetros cúbicos por segundo. Las propiedades térmicas del módulo se refuerzan llenando el volumen cerrado con helio, gas cuya conductividad térmica a temperatura ambiente es mucho mayor que la del aire. La utilización del helio reduce la resistencia térmica interna hasta un valor inferior a la mitad del original.

La resistencia térmica interna (medida entre la pastilla y la placa fría) del módulo ya montado es de nueve grados por watt y por pastilla; la resistencia externa es de dos grados por watt y por pastilla. Con un criterio conservador, el módulo se puede utilizar a un máximo de cuatro watt por pastilla, con una potencia total de 300 watt. Teniendo en cuenta el valor de la resistencia térmica del sistema se deduce que una pastilla que disipara cuatro watt alcanzaría una temperatura de 68 grados, un valor bastante inferior a la temperatura máxima a la que pueden trabajar estos circuitos. El flujo de calor es de unos 20 watt por centímetro cuadrado en la pastilla y de cuatro watt por centímetro cuadrado en el módulo, lo que supone un orden de magnitud mayor que el flujo de calor de un empaquetamiento típico enfriado por aire.

El módulo de conducción térmica representa sólo un nivel de los tres que tiene una unidad de proceso central de tecnología avanzada. El primer nivel es el de las propias pastillas, preparadas en el laboratorio de IBM en East Fishkill. Todos los circuitos lógicos tienen la misma estructura de 704 células lógicas básicas; sin embargo, sobre esta estructura existen tres niveles de conductores metálicos que constituyen diversas configuraciones de puertas y otros dispositivos. Las capas metálicas también suministran potencia a los circuitos y distribuyen las señales entre las células y los terminales de contacto. El tiempo que emplean para la conmutación los circuitos lógicos bipolares contenidos en las pastillas es de 1,1 nanosegundos.



12. EFECTO DEL EMPAQUETAMIENTO sobre el funcionamiento y la fiabilidad de un sistema, puesto de manifiesto al comparar las técnicas de empaquetamiento utilizadas en dos ordenadores fabricados por la International Business Machines Corporation. El IBM 3033 se construyó sobre portadores individuales de pastillas, placas y armazones; el 3081 utiliza módulos de conducción térmica. En la figura se compara un módulo de conducción térmica y un conjunto de componentes del 3033 con el mismo número de circuitos lógicos. El número de conexiones entre los diferentes niveles del empaquetamiento en el módulo de conducción térmica resulta ser menor en un factor de 10. La mayoría de las conexiones restantes son puntos de soldadura entre la pastilla y la placa; este tipo de uniones son mucho más fiables que las uniones mecánicas. La longitud del cableado de señales en un módulo de conducción térmica es ocho veces menor que en su equivalente 3033; lo que se traduce en una reducción sustancial en el tiempo de transmisión.

El tercer componente del sistema representa otro avance importante en la tecnología de empaquetamiento. Este componente consiste en una gran placa con un circuito impreso capaz de conectar hasta nueve módulos de conducción térmica. La placa se proyectó en los laboratorios de la empresa IBM en Endicott. Consta de 20 capas diferentes, entre las que se incluyen seis planos de señal de impedancia controlada. Una placa con nueve módulos mide 60 por 70 centímetros y proporciona las conexiones adecuadas entre los 16.200 terminales de los módulos y los más de 2000 terminales adicionales para los cables que conducen a los demás componentes del sistema. Por otra parte, esta placa suministra a los diferentes módulos del sistema una corriente de hasta un máximo de 600 ampère.

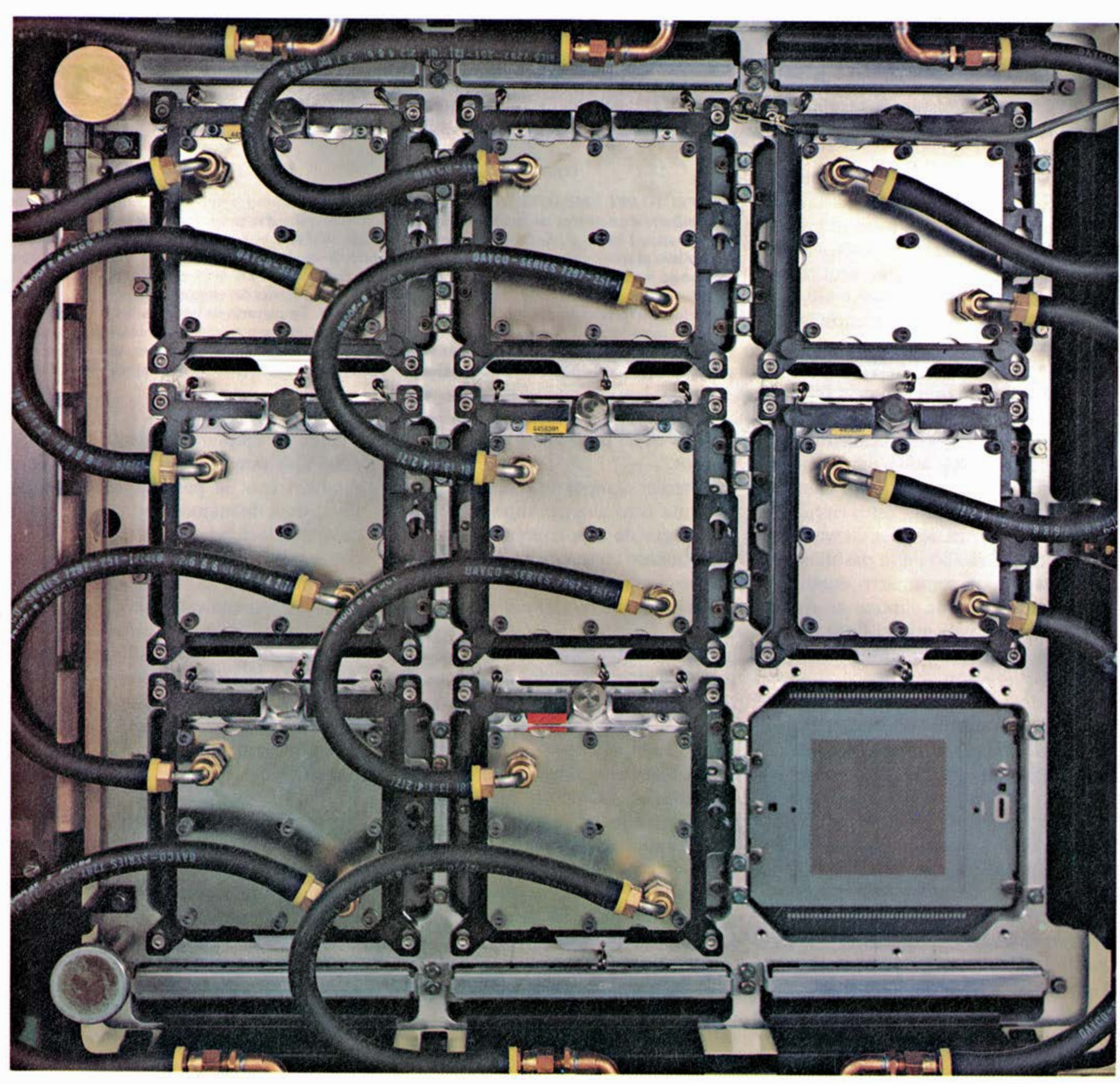
El módulo de conducción térmica y las tecnologías asociadas con él fueron introducidas en 1981 en el ordenador 3081, desarrollado en los laboratorios de la IBM en Poughkeepsie. En uno de los módulos típicos de este ordenador existen 52 emplazamientos de pastillas ocupados por pastillas lógicas. Cuenta también con 34 pastillas de matrices, una forma de memoria semiconductora de alta velocidad que se utiliza para los datos e instrucciones que han de estar disponibles con carácter inmediato para la unidad central de proceso, y con cinco pastillas constituidas por unas matrices de resistores utilizados para ajustar la impedancia de las líneas de transmisión de gran longitud. Un módulo de este tipo puede alojar más de 25.000 circuitos lógicos, 65.000 bits matriciales y casi 500 resistores especiales.

Es instructivo comparar la tecnología de empaquetamiento utilizada en el ordenador IBM 3081 con la de otro ordenador avanzado de la misma firma (concretamente, el 3033), que ha sido construido de acuerdo con una técnica de empaquetamiento más tradicional. En el ordenador 3033 cada pastilla posee un promedio de 12 circuitos lógicos y se aloja en un portador de pastillas individual. A su vez, los portadores están montados con resistores especiales y otros componentes sobre unas placas

con circuitos impresos, que se conectan por uno de sus extremos a otras placas de mayor tamaño. Si las funciones del módulo de conducción térmica que hemos descrito antes se introdujeran en la tecnología del ordenador 3033, se necesitarían 1880 portadores de pastillas para los circuitos lógicos, otros 80 portadores de pastillas para las matrices de memoria y cierto número de componentes adicionales para los resistores especiales. Para montar e interconectar todos estos componentes se necesitarían 52 placas con circuitos impresos, cuatro placas de gran tamaño y todo el cableado preciso para conectar entre sí todas estas placas. Cabe señalar que estos componentes se precisarían para reproducir las funciones de un solo módulo; el sistema 3081 cuenta con un total de 26 módulos.

Vale la pena destacar tres efectos característicos de la tecnología de empaquetamiento basada en los módulos de conducción térmica. En primer lugar, la gran reducción en el soporte físico ("hardware") que se obtiene con esta tecnología se traduce en una reducción significativa en el correspondiente coste. En segundo lugar, la fiabilidad del sistema es muy superior. Las principales causas de avería en los montajes electrónicos son las conexiones entre los diferentes niveles del empaquetamiento. El módulo de conducción térmica ha eliminado totalmente uno de los niveles de empaquetamiento y ha reducido el número de conexiones de señales lógicas entre los niveles restantes en un factor del orden de 10. Por otra parte, la mayoría de estas conexiones son las soldaduras entre las pastillas y el módulo que son mucho más fiables que las conexiones mecánicas utilizadas en empaquetamientos más complejos.

El tercer efecto es un funcionamiento muy mejorado de los respectivos sistemas. La longitud total del cableado lógico en el ordenador 3081 es la octava parte de lo que sería con la tecnología equivalente del 3033. Lo que comporta una reducción en un factor cuatro en el retardo global de la unidad de proceso central, incluyendo los módulos, las placas y los cables; a su vez, este hecho permite abreviar la duración del ciclo de proceso a la mitad de su valor.



13. LAS PLACAS DE CIRCUITOS IMPRESOS montadas en un bastidor de acero macizo constituyen el siguiente nivel en la jerarquía de empaquetamiento de un ordenador 3081. La placa acepta hasta nueve módulos. Ocho de estos módulos se han instalado y conectado al sistema de refrigeración con agua; la novena posición se ha dejado vacante con el fin de que se aprecien las conexiones a las que se unen los 1800 terminales de que dispone cada módulo.

Desarrollo de las hojas de palmera

Las hojas compuestas de las plantas surgen por crecimiento diferencial o por muerte celular selectiva. No ocurre igual en las hojas de palmera, que siguen una pauta de desarrollo que combina ambos procesos

Donald R. Kaplan

Una de las cuestiones centrales de la biología moderna es la relativa al desarrollo de una planta o animal adulto a partir del huevo fecundado, pasando por el estado embrionario. Los pioneros de la biología describieron minuciosamente las etapas del desarrollo en muchos organismos y tejidos, pero la investigación de los procesos fundamentales que controlan el desarrollo tuvieron que esperar el nacimiento de la biología molecular. La misma descripción de las sutiles etapas del desarrollo de muchos tejidos no fue posible hasta la aparición de ciertas técnicas, la microscopía electrónica por ejemplo. Es inmediato que los procesos básicos de las etapas del desarrollo de un tejido serían difíciles de identificar sin caracterizar primero esas etapas.

Un primer ejemplo de cómo hubo que descifrar una pauta compleja de desarrollo antes de poder investigar su control nos lo ofrece la hoja de una familia de angiospermas: las palmeras (Palmae). Todas las plantas que poseen flores presentan tres estructuras principales: raíces, tallo y hojas. De esas estructuras, las hojas son las más heterogéneas. La hoja, además de su papel principal como órgano fotosintetizante, puede modificarse en escama protectora de un nuevo brote, transformarse en órgano trepador, en los órganos reproductores de la flor o incluso en una trampa para insectos. Una hoja sin modificar se caracteriza por una expansión ancha, plana y de color verde, la porción que posee mayor concentración de clorofila, intercepta la luz del sol y actúa como órgano intercambiador de gases. Se trata, empero, de uno solo de los tres componentes de la hoja. En lenguaje técnico se la llama lámina y, de modo más informal, limbo.

Lo que sujeta al limbo, el segundo componente de la hoja, es el pecíolo (nombre tomado del latín por el gran Linneo, que significa piececillo). El pecíolo sirve fundamentalmente como conducto que lleva los productos nutritivos de la fotosíntesis, desde el limbo de la hoja hasta el tercer componente, la base de la hoja, que une las otras dos partes de la misma al tallo de la planta. Además de servir de apoyo mecánico para las otras dos partes y llevar nutrientes del pecíolo al tallo (y por tanto a la planta entera), la base rodea y protege al resto de la hoja en la forma embrionaria más joven, cuando la futura hoja no es más que parte de un brote terminal de un tallo.

¿Cómo se desarrolla una hoja a partir de un brote? Aunque discutiré el proceso refiriéndome a representantes de las palmeras, será útil incluir miembros de una familia muy emparentada: los aros (Araceae). El crecimiento de las hojas de las palmeras y los aros, desde el estado embrionario hasta la madurez, se realiza por caminos distintos, desconocidos hasta hace muy poco.

El desarrollo de las plantas difiere mucho del que atraviesan los animales. En la mayoría de éstos, la formación de nuevos órganos está limitada a las primerísimas fases del crecimiento embrionario. En las plantas es un proceso continuo; surgen órganos nuevos ininterrumpidamente de centros embrionarios de crecimiento: tejidos indiferenciados constituidos por células capaces de transformarse en una gran variedad de órganos vegetales. Los centros de crecimiento, en los extremos de la planta, están formados por tejido embrionario localizado en los ápices de la raíz y del tallo. Tales tejidos se denominan meristemos apicales.

En el sistema típico de una yema, el meristemo inicia un nuevo crecimiento del tallo, con las hojas situadas a lo largo de éste, según un modelo geométrico preciso. Dado que los nuevos incrementos de tallos y hojas aparecen durante un período prolongado, podría parecer que las yemas de las plantas serían un conjunto de unidades estructuralmente idénticas, como los segmentos de una lombriz de tierra. Por ejemplo, los que estudian el desarrollo de las hojas convienen en que, si se colocaran en orden de edad creciente las hojas situadas debajo del brote terminal de un tallo, la secuencia ilustraría las etapas que atravesaría la hoja en una posición dada del tallo, si se siguiera su desarrollo durante un cierto tiempo.

En realidad, tal suposición sólo es válida si la planta tiene un crecimiento armónico, esto es, si las sucesivas hojas y unidades de tallo son idénticas. Pero se conocen numerosos ejemplos en que la hoja y la estructura del tallo cambian notablemente al crecer la yema. En tales circunstancias, al registrar el crecimiento de la hoja es necesario, en primer lugar, especificar una cierta posición de ésta a lo largo del tallo y concentrarse luego en el desarrollo de esa hoja en particular.

Cuando se origina una hoja, en forma de un abultamiento de la periferia del ápice del tallo, toma la imagen típica de una almohadilla aplastada que no muestra señales de diferenciación. A medida que progresa en su crecimiento, las dos primeras partes que se definen en orden emergente son la base de la hoja y el limbo. El pecíolo, si se desarrolla, surge como una inserción entre la base y el limbo.

Las hojas de las angiospermas presentan una gran variedad de formas y tamaños. Una de las variantes de forma más comunes es la hoja dividida, o compuesta. Los limbos de estas hojas aparecen cortados en segmentos o foliolas; los botánicos las conocen por hojas pinnadas (del latín *penna*, pluma). En términos de desarrollo comparativo, las hojas divididas poseen particular interés porque ilustran claramente cómo diferentes vías de desarrollo pueden conducir a hojas de apariencia muy similar. Las gigantescas frondes de las palmeras son las mayores y más

complejas de todas las hojas divididas. Por otro lado, el género de los aros tropicales, una familia famosa por la diversidad de formas de sus hojas, nos proporciona un ejemplo clásico de dos modos de división foliar completamente diferentes. Veamos en primer lugar el caso de los aros.

Las hojas maduras de la especie *Zamioculcas zamiifolia* presentan un limbo pinnado compuesto: cuatro o cinco pares de segmentos de limbo aparecen como apéndices a cada lado de un tallo alargado o raquis (término latinizado que procede del que en griego designa la costilla). Cuando se estudia el brote terminal de un tallo de *Z. zamiifolia* retirando sucesivamente las hojas jóvenes, se nos revela una estructura diminuta en forma de cúpula de 100 micrometros de diámetro. Se trata del meristemo apical del tallo: a medida que cada primordio foliar crece, envuelve la cúpula apical, y los dos bordes libres de la caperuza se junta apretadamente.

El crecimiento de diferentes tejidos a velocidades distintas les da muy pronto a las futuras foliolas de la hoja la apariencia de protuberancias verrugosas a lo largo de los dos bordes libres de la hoja. Las protuberancias más viejas y algo mayores aparecen hacia el ápice de la hoja; las jóvenes y más pequeñas surgen progresivamente más cerca de la base. Cuando ya tenemos un conjunto de cuatro o cinco pares de foliolas, el crecimiento continúa y las protuberancias adoptan pronto la forma de foliolas maduras.

Este mecanismo de iniciación de foliolas a partir del margen libre de una hoja es el proceso más común de desarrollo entre las plantas superiores con



1. PALMERA COCOTERA, posiblemente el más abundante de todos los miembros cultivados; presenta gran abundancia de hojas compuestas y racimos de nueces con valor comercial. Las foliolas individuales de las frondes adquieren su forma a través de un proceso de desarrollo muy complejo.

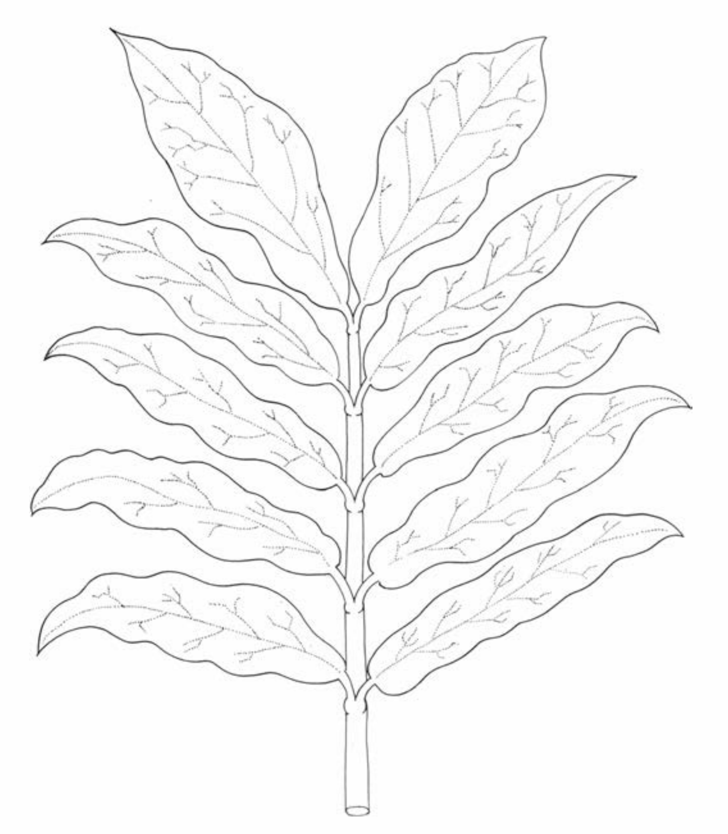
hojas divididas, ya sean plantas vasculares sencillas como los helechos, gimnospermas como las cicadas, o plantas superiores con flores (angiospermas). A través de grados progresivos de complicación, las hojas compuestas pueden dividirse dos, tres o muchas veces. No hay límite al grado de complicación que puede encontrarse en una hoja dividida.

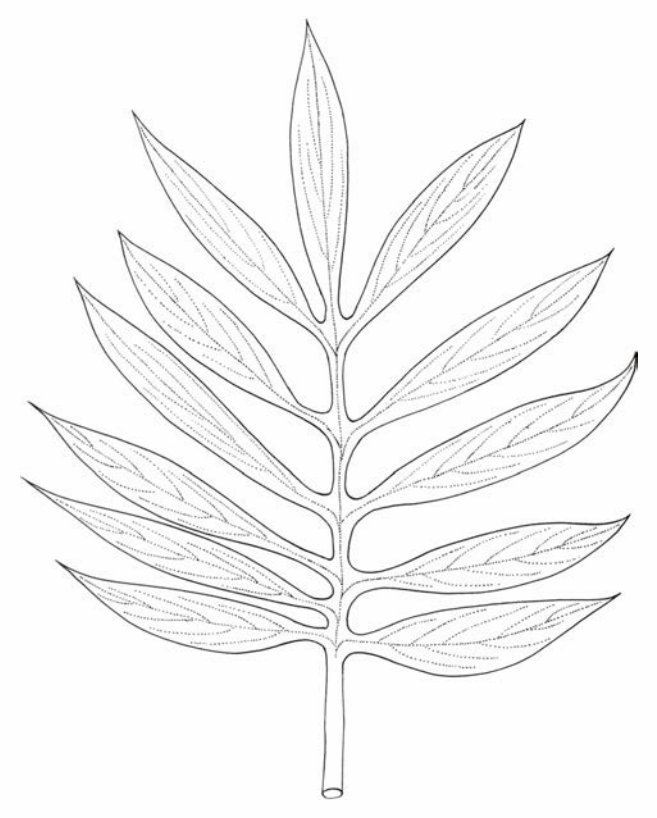
El aro que muestra un modelo completamente diferente de división foliar se conoce popularmente como filodendro de hoja partida, un género trepador de *Monstera*. Estas plantas se caracterizan por tener un agujero en los limbos de sus hojas; gozan de una gran difusión y se cultivan ampliamente como plantas ornamentales. El tamaño y forma de los orificios varían en diferentes partes del limbo, pues las distintas zonas presentan también tasas de crecimiento desiguales. Por ejemplo, los primeros orificios que aparecen se sitúan muy cerca del margen del limbo; en la madurez son anchos y con forma elíptica, puesto que esta parte del limbo experimenta la máxima expansión lateral. Los orificios que se desarrollan más tarde se localizan cerca del nervio medio. Tienden a ser más pequeños y a mantener su forma redondeada original, porque el tejido envolvente apenas experimenta crecimiento lateral.

Se ha sabido desde hace más de un siglo que los agujeros de las hojas del filodendro se producen como áreas localizadas de muerte celular. El microscopio electrónico de barrido nos permite observar el proceso con bastante detalle. El primer signo del inminente acontecimiento es la aparición de un área circular, ligeramente dentada, sobre la superficie del limbo de la hoja. La indentación refleja la disminución de turgencia (contenido de fluidos) de las células afectadas. Cuando las células mueren, la parte de la hoja que las contiene se seca y se desprende, dejando en su lugar una perforación.

En muchas especies del género *Monstera*, la cinta marginal de tejido adyacente a los agujeros más periféricos no crece en anchura a la misma velocidad que lo hace el resto del limbo. Por ello, este delgado puente de tejido marginal suele romperse, convirtiendo lo que era una hoja perforada en una lobulada marginalmente. En efecto, en algunas especies (por ejemplo *M. subpinnata*, *M. tenuis* y *M. dilacerata*) el limbo foliar forma un único conjunto de perforaciones elipsoides cerca de su mismo borde. Cuando estas perforaciones pierden sus puentes, resulta un limbo foliar pinnado lobulado que se parece muchísimo a las hojas pinnadas de *Zamioculcas zamiifolia*. Si no supiéramos que la hoja dividida de *Monstera* se había formado por el proceso de muerte celular y la de *Zamioculcas* por el de lobulación, sería imposible averiguar que cada una de ellas era el resultado de un programa de desarrollo completamente diferente.

Como los aros, las palmeras constituyen una gran familia de plantas tropicales con una distribución universal. No sólo son grandes y complejas sus hojas, sino que una especie del género palmera, *Raffia*, posee las mayores hojas de todo el reino vegetal. Sus foliolas pueden llegar a 18 metros de largo. Las palmeras elaboran un limbo dividido por un proceso completamente diferente de cualquiera de los que tienen lugar en los aros. En algunos aspectos, sin embargo, los procesos representan una combinación del lobulado del aro y de la muerte celular. Ante la gran complejidad del modo de producción foliar de las palmeras y consi-

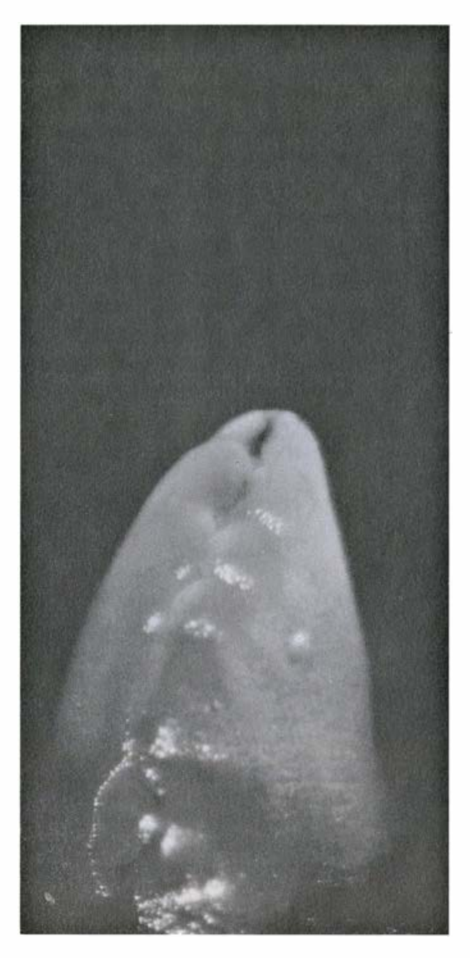


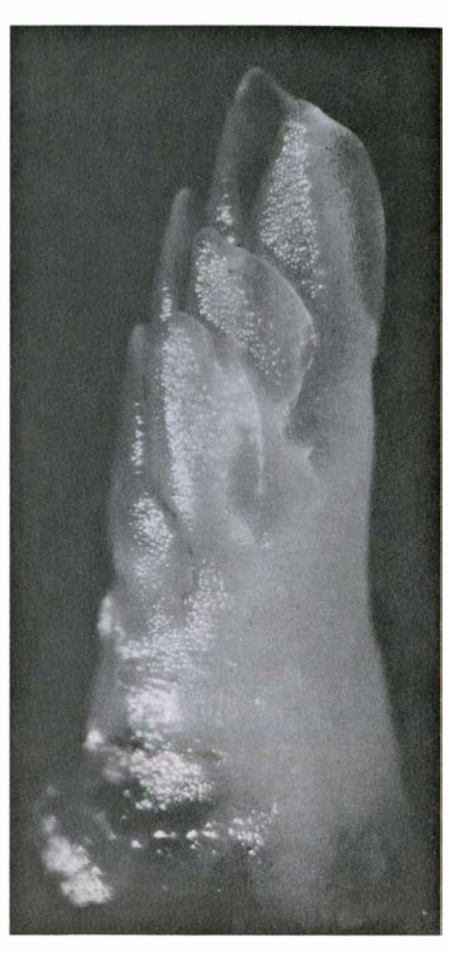


2. HOJAS DISECADAS de dos aros tropicales, que se parecen mucho en la madurez aunque siguen vías de desarrollo completamente diferentes. A la izquierda, hoja de *Zamioculcas zamiifolia*, de limbo pinnado compuesto; sus cinco pares de foliolas se inician como protuberancias verrugosas a lo largo del margen del limbo foliar embrionario (*véase la figura 3*). A la derecha, una hoja de la planta ornamental *Monstera subpinnata*, conocida popularmente como filodendro de hoja hendida. Sus 12 foliolas se forman originalmente de un único limbo, antes de que el desarrollo de áreas localizadas de muerte celular divida el limbo foliar en foliolas separadas (*véase las figuras 4 y 5*). No se aprecia, en la madurez, que hayan seguido vías de desarrollo diferentes.

derando los muchos aspectos no resueltos del proceso, mis colegas de la Universidad de California en Berkeley y yo mismo nos fuimos a investigar el desarrollo de la hoja de palmera con el fin de definir sus distintas etapas fundamentales.

Todas las hojas de palmera tienen tres componentes tipo: un limbo y pecíolo alargados y una base de la hoja, característicamente tubular, que rodea completamente al tallo. En las palmeras, la base de la hoja desempeña un papel particularmente significativo. No solamente soporta los pesados órganos fotosintéticos del limbo y pecíolo, sino que también actúa como soporte de las regiones més jóvenes del tallo (o tronco) de la palmera, donde los entrenudos (o unidades individuales del tallo) aún se están elongando. Esta es la razón de que todas las bases de las hojas de palmera presenten una compleja red de fibras y haces tubulares, que dotan a la base de la hoja de refuerzo mecánico a la vez que de flexibilidad.





3. HOJA EMBRIONARIA de *Z. Zamiifolia* en una etapa temprana de su desarrollo, a la izquierda, y en una etapa ligeramente más avanzada, a la derecha. Las muestras miden 1,7 y tres milímetros de largo, respectivamente. Las protuberancias de los márgenes libres de la hoja más joven se perciben mejor como foliolas emergentes en la más vieja; comienzan a aproximarse, en esta última, a su forma madura.

Los limbos de la hoja de palmera suelen mostrar dos tipos de configuraciones, que reflejan diferencias en la distribución del crecimiento a lo largo de la división. Uno de ellos se denomina pinnado, porque se parece a una pluma. El otro se denomina palmado, porque es de tipo abanico, algo así como una mano con los dedos extendidos. Las formas pinnadas suelen tener pecíolos cortos; las frondes palmadas los tienen largos.

Lo que hace del desarrollo de las hojas de palmera algo singular es que en principio las superficies de su limbo se proyectan en una serie de pliegues. Un proceso de separación de tejido a lo largo de alguno de estos pliegues escinde posteriormente la superficie plegada en una serie de foliolas. Es fácil apreciar, mirando una hoja de palmera, que la naturaleza segmentada procede del plegamiento del limbo foliar. En realidad, como un abanico japonés, la hoja puede cerrarse apretando los pliegues. Puesto que cada foliola en sección transversal tiene forma de *V*, parece como si se hubiera separado de una superficie plegada.

El desarrollo de la hoja de palmera de tipo pinnado implica en general el mismo proceso. Sin embargo, es más sutil y más complicado, y podrá comprenderse mejor siguiendo el desarrollo de dicha hoja pinnada desde el comienzo hasta la madurez. Las foliolas laterales de la hoja pinnada están distribuidas a lo largo del eje del nervio foliar y se forman cuando el nervio medio está elogándose.

El primordio de una hoja pinnada de palmera surge como un recrecimiento del ápice del tallo. Semeja un casco ajustado sobre la cúpula apical. La parte del primordio que se proyecta por encima y a los lados del ápice del tallo es el futuro limbo. La futura base de la hoja, a su vez, aparece como un crecimiento en forma de collar, iniciado alrededor de la periferia del ápice del tallo; la forma de esta temprana estructura basal prefigura el subsecuente envolvimiento completo del tallo por la base de la hoja.

El joven primordio pronto parece más una caperuza que un casco. La superficie externa, que queda más a la vista, corresponde a la superficie inferior del futuro limbo de la hoja; su superficie interior, más estrecha, será la futura superficie superior del limbo. Los márgenes, o bordes libres, del primordio representan el límite entre las superficies del futuro limbo.

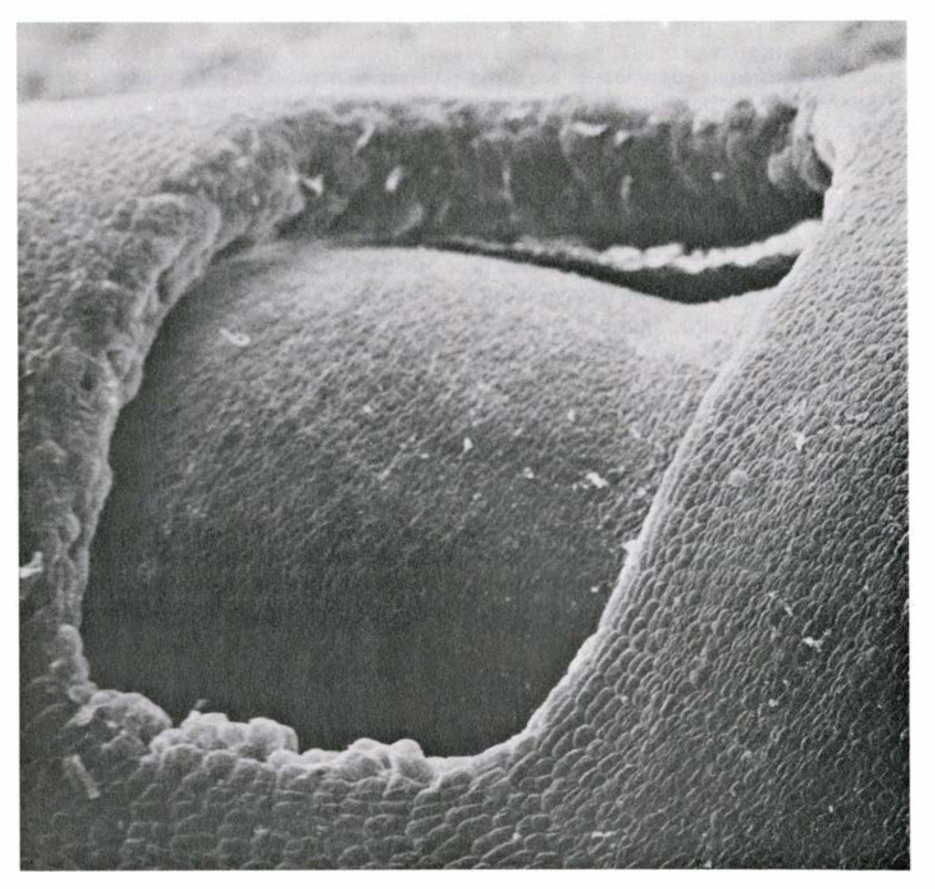
Mientras que en el aro *Zamioculcas*, de crecimiento por lobulación, la iniciación de las foliolas implica lobulación a lo largo del borde libre de la hoja, las futuras foliolas de la hoja pinnada de la palmera aparecen primero como una serie de rizos o crestas sobre la superficie del limbo, algo separadas de sus bordes. Los dobleces no sólo se aprecian claramente en la que será superficie inferior del limbo, fácilmente visible, sino que también se dan en la superficie superior. Un corte practicado en ángulo recto respecto a uno de los márgenes de la hoja, y que atraviese esas crestas, nos revela que las crestas inferior y superior constituyen un único conjunto de pliegues que recorre todo el limbo en un zigzag comprimido.

Lo que hace únicos en el desarrollo foliar a esos pliegues es su restricción espacial. Nunca se extienden, por ejemplo, hasta los bordes del limbo, con lo que la hoja en crecimiento lleva una banda de tejido no plegado alrededor del perímetro. De igual forma, en el asentamiento de las foliolas, los pliegues se extienden hasta una distancia muy corta del nervio medio foliar.

A medida que crece la hoja, apare-



4. PERFORACIONES DE LA HOJA pueden apreciarse en esta micrografía electrónica de barrido, que aumenta 35 veces una hoja en desarrollo; acaban seccionando el limbo de una hoja de *Monstera* en foliolas individuales. En la parte más joven de la hoja, a la derecha, la futura perforación aparece como una indentación sobre la superficie del limbo foliar. En la parte más vieja, a la izquierda, parte del tejido necrosado se ha desgarrado del borde que le rodea, formado por células del limbo sanas y turgentes.



5. UNA ETAPA POSTERIOR DE PERFORACION FOLIAR se aprecia en esta micrografía electrónica de barrido de un limbo foliar de *Monstera*. El tejido muerto ha desaparecido. A medida que la hoja continúa creciendo, el tejido de la parte inferior, entre el borde inferior de la perforación y el margen del limbo, se rompe, convirtiendo las dos partes de la perforación en el borde inferior de una foliola y el superior de la siguiente. Esta muestra de *Monstera*, de 17 milímetros de largo, aparece a 35 aumentos.

cen nuevos pliegues. La mayoría se añaden hacia la base del limbo foliar, pero algunos pueden aparecer también hacia el ápice. El número total de pliegues se corresponde normalmente con el número de foliolas que se encuentran en la hoja madura y, por tanto, el desarrollo de los pliegues adicionales termina cuando se ha alcanzado aquel número. En esta etapa, los pliegues se hallan fuertemente comprimidos, como los de un fuelle de cámara fotográfica.

La siguente etapa, la más complicada del desarrollo de la hoja pinnada de palmera, tiene lugar cuando los pliegues se han hecho más profundos. Las etapas son dos: separación de los pliegues en foliolas individuales y pérdida del tejido de la banda periférica del limbo foliar que aún enlaza las foliolas por sus puntas. En la primera etapa, los pliegues adyacentes se separan entre sí. Aunque no se conoce en detalle las peculiaridades celulares del proceso, se supone que la separación se efectúa por desintegración de la sustancia cementante intercelular a lo largo de la línea de separación. Se sabe con certeza que no está implicada la muerte selectiva de las células, pues no hay señal de daño o destrucción celular a lo largo de la separación.

Antes de proceder a la segunda etapa de la formación de la foliola, deben mencionarse algunas características generales de los primeros estadios del desarrollo de la hoja de la palmera. Una de ellas es que en la mayoría de las especies de palmeras de hojas pinnadas el proceso de separación se realiza a lo largo de las crestas de la superficie externa de lo que será la futura superficie foliar inferior. El proceso da lugar a foliolas individuales en forma de *V*. La observación del proceso al microscopio electrónico de barrido muestra que, en la parte superior de la cresta, se forma una indentación. A medida que se efectúa la separación, la indentación de la cresta se transforma en una rendija muy nítida.

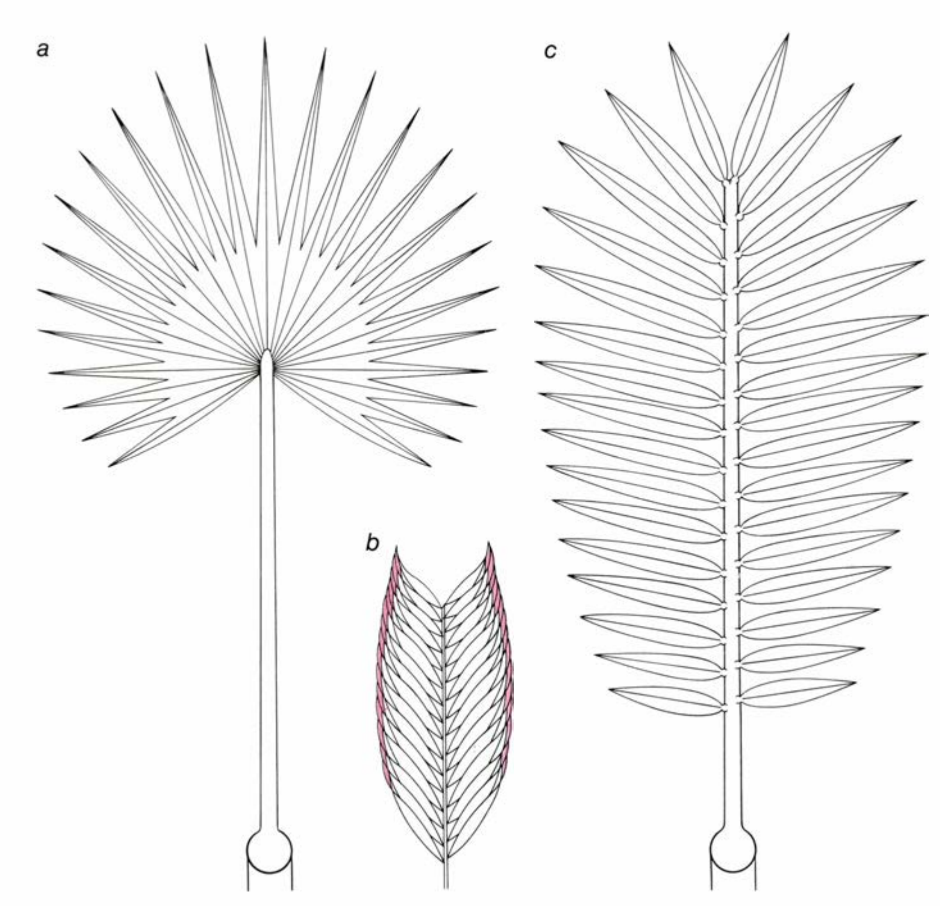
Volviendo a la segunda etapa, aun cuando las foliolas se hayan separado unas de otras en la mayor parte de su longitud, sus puntas permanecen unidas a la banda de tejido marginal del limbo. Esta situación no durará mucho tiempo, aunque tras el inicio de la ruptura del tejido puedan permanecer unidas a las puntas de las crestas de las foliolas bandas casi separadas del margen. Por su parecido con el aparejo de una caballería, estas cintas colgantes se denominan «riendas» de la hoja.

La forma en que se originan los plegamientos de la hoja de palmera ha sido objeto de controversia en los medios botánicos durante siglo y medio. Las dos hipótesis de desarrollo, que representan alternativas morfogenéticas radicalmente diferentes, han tenido hasta hace poco su cohorte de partidarios. La más simple y directa de las dos hipótesis propone que el plegamiento resulta de un doblez inicial producido por crecimiento diferencial en el limbo joven de la hoja.

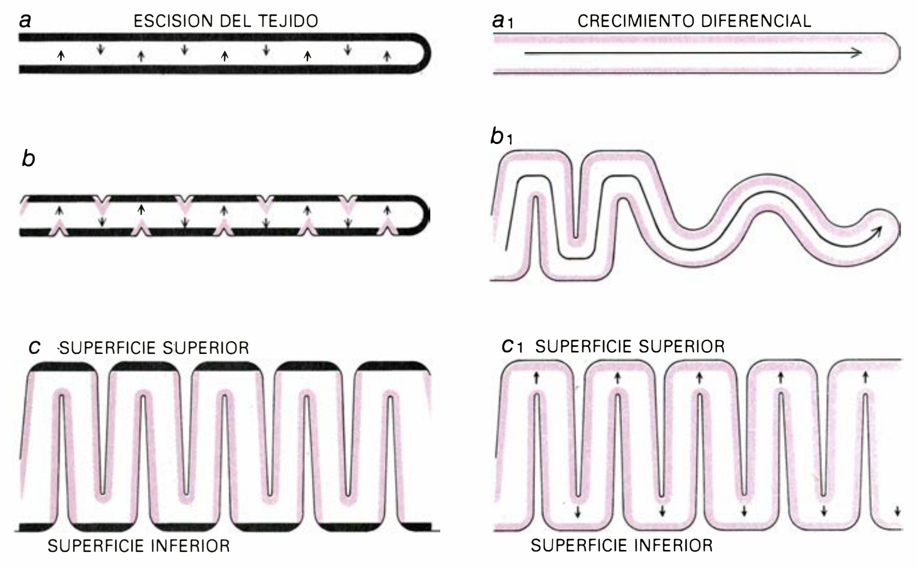
La segunda hipótesis sugiere que el plegamiento comienza con un proceso inicial de separación de tejidos, al que sigue un crecimiento diferencial. De acuerdo con esta hipótesis, a lo largo de la superficie superior e inferior del limbo se desarrollan grietas alternantes, puesto que la progresiva separación de las células comienza en la superficie del limbo y forma un surco que se extiende hasta el interior de la hoja. A medida que se separan las células, profundiza la penetración interior hasta que el diseño en zigzag del limbo resulta difícil de distinguir de un trazado producido por plegamientos, particularmente después de la compresión de los dobleces.

La mayor complejidad de la segunda hipótesis con respecto a la primera estriba en que se apoya en algunas notables proezas de diferenciación celular. Consideremos la capa de células situada sobre la superficie del limbo foliar, la epidermis foliar. De acuerdo con la hipótesis, el desarrollo de los surcos dividirá la epidermis foliar en parches aislados en la superficie. Si, como se observa, los lados de los surcos están también cubiertos por una capa de células epidérmicas, algunas de las células deben haberse regenerado a partir de células ubicadas en el interior de la hoja. Sin embargo, el destino de estas células interiores no sería, normalmente, el de convertirse en células epidérmicas. ¿Es posible tal regeneración? Si lo es, representaría un mecanismo único entre las plantas superiores.

La pregunta era lo suficientemente fascinante para convertir a Nancy y Ronald Dengler, de la Universidad de Toronto, en aliados de mi investigación. Aunque lo que denominaré de ahora en adelante hipótesis de "escisión del tejido" carecía de pruebas indiscutibles en su favor, existían varias razones por las cuales este mecanismo podía darse en las palmeras. El primero era que algún tipo de separación de tejido estaba



6. UNA HOJA ADULTA DE PALMERA muestra generalmente forma de abanico (*a*), con un largo pecíolo que separa el limbo de la hoja de su base, o forma de pluma (*c*), con un pecíolo corto y foliolas a cada lado de una costilla central. Antes de que se despliegue la serie de foliolas (*b*) debe desprenderse de sus "riendas" (*color*): tiras delgadas del margen del limbo que conectan los ápices de las foliolas.



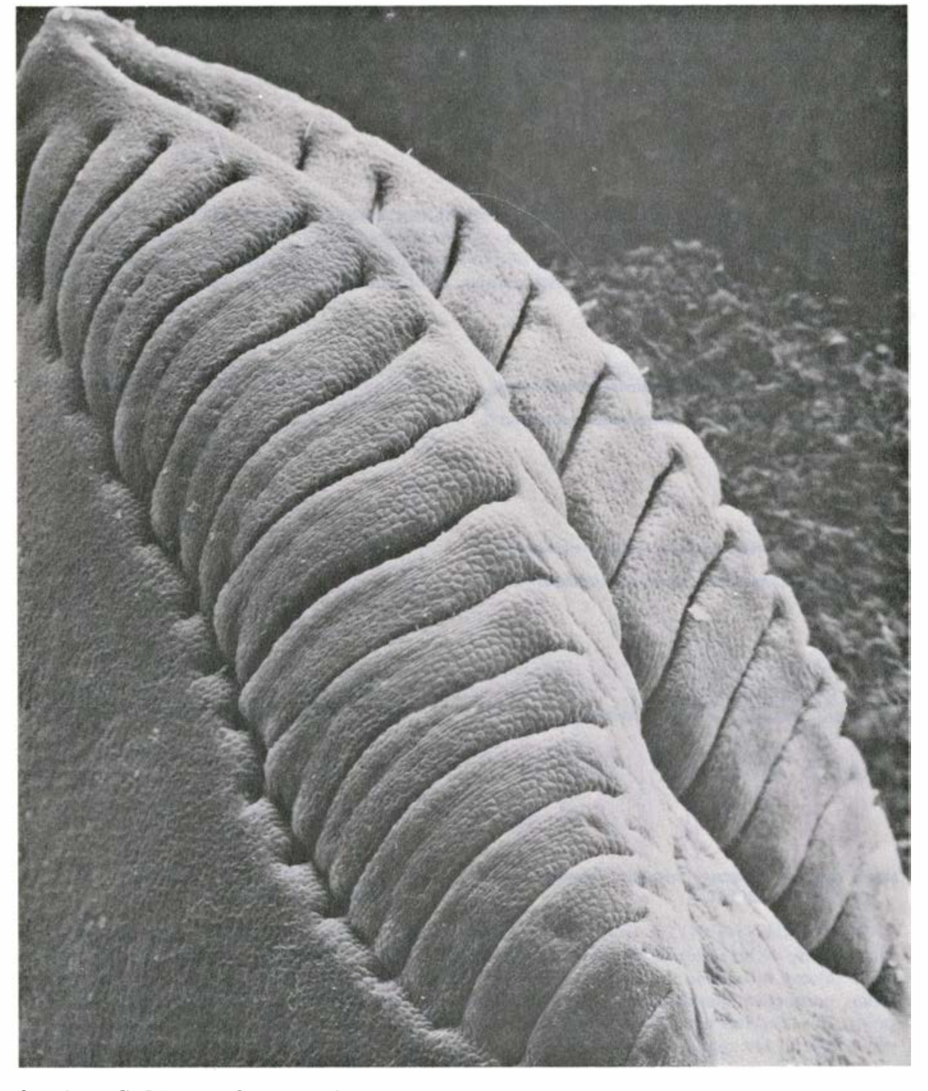
7. PLEGAMIENTO DE LA HOJA DE PALMERA. Solía explicarse según dos modelos de desarrollo mutuamente excluyentes. El primero, que se muestra en las tres etapas del diagrama de la izquierda, se inicia (*a*) con la escisión del tejido (separación celular) en las superficies superior e inferior del limbo foliar, un proceso que dividirá la capa epidérmica del limbo (*gris*) en unidades desconectadas (*b*). Al progresar el crecimiento del limbo (*c*) las zonas del tejido del mesófilo que conectan las superficies superior e inferior se expandirán apreciablemente (*color*) y, de alguna manera, se regenerarán como células epidérmicas. La vía alternativa de desarrollo, a la derecha, contempla el plegado como el resultado del "crecimiento diferencial" (a_1, b_1), donde los pliegues se formarían primero por presión durante el crecimiento y posteriormente se extenderían por un proceso de crecimiento ascendente y descendente dentro del limbo foliar, manteniendo una capa íntegra de tejido epidérmico (*color*) a lo largo del proceso (c_1). El autor y sus colegas, estudiando micrografías electrónicas de barrido de secciones delgadas de diferentes hojas de palmeras, concluyeron que la hipótesis de escisión del tejido no era sostenible, porque no se apreciaba separación de las células; sí se observaba, en cambio, la existencia de crecimiento celular.

implicado en la escisión de los pliegues de la hoja en foliolas individuales. Siendo así, ¿no podía el mismo proceso ser responsable en primer lugar del origen de los pliegues? William de Occam seguramente habría aprobado un único programa de desarrollo mejor que dos diferentes.

Un segundo dato en favor de la escisión del tejido procede de la observación al microscopio electrónico de barrido de hojas jóvenes de palmeras: los surcos del pliegue inicial se parecían mucho a estrechas rendijas cortadas en la superficie de la hoja. Este hecho, junto con la observación de que en algunas especies de palmera los pliegues parecían estar tallados y separados por estrechas rendijas, nos inclinó aún más por la hipótesis de escisión del tejido.

Una revisión de la bibliografía científica nos hizo ver por qué las dos hipótesis habían permanecido sin resolución durante tan largo tiempo: los primeros investigadores, al carecer de instrumentos potentes, habían aceptado necesariamente como datos definitivos la morfología superficial de los pliegues. Tomaron estas indicaciones como pruebas de que el proceso funcionaba así, en vez de basarse en datos más fundamentales, independientes de la morfología superficial.

Decidimos abordar las bases celulares y anatómicas del origen del plegamiento en hojas de diferentes especies de palmera, utilizando el microscopio electrónico de barrido, además del óptico, con el fin de dedicar atención particular a los aspectos tridimensionales del desarrollo del limbo foliar. También estudiamos secciones finas de tejido de las plantas (de 1,3 micrometros de espesor) preparadas por las mismas técnicas usadas en microscopía electrónica de transmisión. (En microscopía electrónica de transmisión, al contrario que en la de barrido, los electrones tienen que atravesar la muestra). El uso de estas secciones delgadas nos dio imágenes de resolución óptima al microscopio óptico, permitiéndonos eliminar muchos de los artefactos, elementos equívocos que habían confundido a investigadores anteriores.



8. DOBLECES DE PLEGAMIENTO vistos al microscopio electrónico de barrido en el limbo en formación de una hoja de palmera pinnada de *Chamaedorea*. La muestra, de 3 milímetros de largo, está aumentada 45 veces. Las crestas interiores de la derecha, al igual que las de las izquierda, que aquí apenas se distinguen, se transformarán en los nervios medios de cada futura foliola. Algunas crestas exteriores de las foliolas (sólo se ven aquí las del margen izquierdo) muestran depresiones axiales centrales en desarrollo. La escisión del tejido progresará en las depresiones hasta que cada foliola se separe de la contigua.

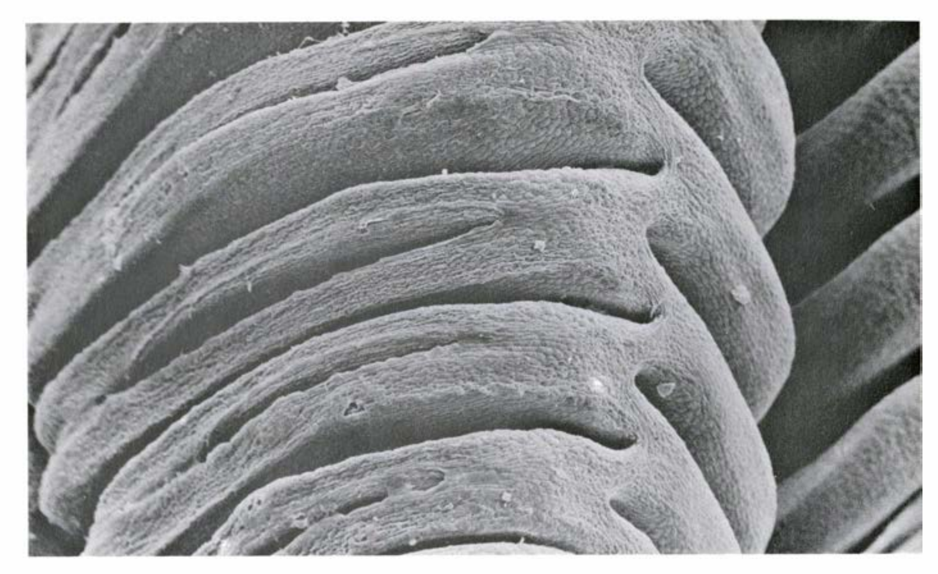
De acuerdo con ambas hipótesis sobre el origen de los plegamientos, a saber, la escisión del tejido y la del crecimiento diferencial, los surcos que separan las crestas de los pliegues deben profundizarse a medida que avanza el crecimiento. En el modelo de escisión del tejido, los propios surcos se hacen más profundos. En el modelo de crecimiento diferencial, el aumento en profundidad sería causado por crecimiento hacia arriba desde la base del surco. Podría determinarse de forma inequívoca qué modelo funcionaba con sólo contar el número de células que quedan en contacto con las crestas de los pliegues inferior y superior, bien por debajo o por encima de las respectivas líneas del surco.

Así, predijimos que, si se trataba de la división del tejido, entonces el número de células que quedaba en contacto frente a la base de un surco disminuiría con el tiempo, puesto que las células resultaban separadas por las mismas fuerzas de separación celular que profundizaban el surco. También predijimos que si la creciente profundización del surco era el resultado del crecimiento de la cresta, de acuerdo con el modelo de crecimiento diferencial, entonces el número de células en contacto con la línea del surco debería aumentar (si el crecimiento de las crestas adyacentes implicaba división y crecimiento celular simultáneamente) o permanecer constante (si el crecimiento implicaba solamente crecimiento celular).

El contaje de células demostró que la profundización de las líneas del surco resultaba del crecimiento de la cresta, y no de la separación celular. Aunque el proceso no era idéntico para las crestas de los pliegues superior e inferior, no se advirtió, en ningún caso, disminución en el número de células (un signo de escisión). En las crestas superiores el número de células aumentaba inicialmente; en las crestas inferiores, el número permanecía casi igual. Observaciones posteriores corroboraron la hi-

pótesis del crecimiento diferencial. Se observó que los pliegues tenían una capa epidérmica continua sobre sus superficies dobladas durante todas las etapas del desarrollo. Por los mismos indicios no hubo señal, en ningún momento, de escisión y rediferenciación de la capa epidérmica.

Nuestros estudios incluyeron especies de palmeras palmeadas y pinnadas y dieron virtualmente resultados idénticos, con independencia de la morfología específica del limbo. Por tanto, sugerimos que nuestros descubrimientos probablemente sean válidos para cualquier miembro de la familia de las palmeras. Quedan, sin embargo, otros temas por resolver. ¿Por qué los pliegues del primordio de las hojas de algunas especies adoptan una forma que en principio sugiere escisión del tejido? Habiéndonos equivocado nosotros mismos, ansiábamos averiguar qué fuerzas podían influir en la forma de los pliegues, una vez iniciados.



9. CRESTAS EXTERNAS IZQUIERDAS del mismo limbo que aparece en la figura 8, a igual aumento. La escisión del tejido de las crestas exteriores ha progresado; se aprecia mejor la relación entre las futuras medias foliolas y sus respectivos nervios medios. (La micrografía pertenece a Donald R. Kaplan.)

Se había sugerido en el siglo XIX que las limitaciones de espacio que se dan en el brote provocaban el plegamiento inicial del primordio de la hoja de palmera. La propuesta se inspiraba, casi con seguridad, en la aparición de hojas jóvenes fuertemente plegadas en la corona de las palmeras. ¿Podría aplicarse esta relación entre plegamiento y restricción de espacio, evidente en etapas posteriores del desarrollo foliar, a las etapas en que el primordio foliar era de un tamaño casi microscópico y el apelotonamiento parecía improbable? Pruebas circunstanciales sugerían que no era ese el caso. Por ejemplo, si el plegamiento obedeciera a limitaciones de espacio, podría esperarse lógicamente que toda la superficie del limbo estuviera plegada. Sin embargo, los márgenes del limbo foliar nunca aparecen plegados. Aún más, cuando se analiza la relación entre el espacio que queda dentro de la vaina de la próxima hoja más vieja y la forma y distribución de los pliegues en el limbo de la inmediata más joven, no se encuentra correlación entre el espacio disponible para la expansión y la orientación y cantidad de pliegues.

Ello no quiere decir que las limitaciones de espacio del brote no condicionen la forma de los pliegues. Por ejemplo, en las palmeras que tienen las hojas del brote fuertemente empaquetadas, la superficie foliar externa aparece plana y los surcos de los pliegues semejan rendijas cortadas en el limbo foliar. Sin embargo, en palmeras que tienen las hojas empaquetadas de un modo menos compacto, los pliegues sobresalen claramente, dando la impresión de que se forman al doblarse el limbo, y no por escisión del tejido.

Una prueba definitiva del posible papel desempeñado por el apelotonamiento en el plegamiento del limbo foliar sería cultivar primordios foliares aislados en un medio nutritivo que permitiera observar su desarrollo en un medio no superpoblado. Experimentos piloto han establecido la posibilidad de cultivar tales primordios in vitro desde etapas tempranas, cuando no tienen más de un milímetro de longitud. Sin embargo, aún no hemos abordado un análisis riguroso de su desarrollo para ver cómo puede compararse la situación in vivo.

Nuestros estudios del desarrollo de la hoja de palmera se inspiraron en la sugerencia según la cual la división del limbo foliar en foliolas implicaba un proceso único en el reino vegetal: la escisión de tejido. La investigación establece, sin embargo, que mientras que un proceso de escisión del tejido es, en efecto, responsable a veces de la división de los plegamientos iniciales del limbo foliar en distintos segmentos, el desarrollo de un limbo foliar plegado es un proceso más complicado que el simple crecimiento diferencial.

En resumen, el proceso morfogenético responsable de la división de la hoja de palmera es casi idéntico al proceso responsable del desarrollo típico de las foliolas en *Zamioculcas*. Difieren sólo en el lugar donde se produce el crecimiento diferencial. En el aro, este lugar es el borde libre del limbo foliar, mientras que en la palmera el crecimiento se produce dentro de la superficie del limbo, a cierta distancia del borde del mismo. En realidad, se puede argumentar que todas las complejas características del desarrollo de la hoja de palmera, desde el plegamiento y separación del tejido, pasando por pliegues selectivos, hasta la abscisión final de las riendas, es una consecuencia de la iniciación de las foliolas en el limbo, en vez de en el borde. Visto así, las muchas peculiaridades del desarrollo de la hoja de palmera parecen bastante menos aberrantes.

A la larga, los intereses de la botánica no se verían cubiertos con la nueva catalogación de vías de desarrollo de las plantas. El fin último del botánico debe ser acoplar esa información sobre el desarrollo con la abundancia de datos que proceden del nivel molecular de la organización biológica. La mayoría de los biólogos moleculares suponen que los sistemas de control que diligentemente han descrito en las plantas tienen que encontrarse en todas las plantas superiores. Eso puede no ser cierto. Quizás los diferentes tipos de desarrollo descritos aquí indiquen diferencias mayores en el sistema de control molecular de lo que ahora nos parece. Los futuros estudios de morfogénesis habrán de desempeñar un importante papel en el modo como los botánicos abordan el mecanismo de crecimiento y desarrollo de las plantas, si algún día logran integrar la información disponible en otros campos de la investigación biológica.

Partículas con belleza desnuda

El quinto quark, que incorpora el "sabor" llamado belleza, se ha visto ya en combinación con un antiquark de sabor diferente. Se expone aquí la belleza de las nuevas partículas compuestas

Nariman B. Mistry, Ronald A. Poling y Edward H. Thorndike

Se admite hoy que los constituyentes últimos de la materia son un pequeño conjunto de partículas indivisibles llamadas quarks y leptones. El mundo de nuestra experiencia diaria está compuesto, casi enteramente, por un tipo de leptón, el electrón, y dos tipos de quarks: "arriba" (*up*) y "abajo" (*down*), *u* y *d*. (La denominación es, por supuesto, arbitraria.) Los quarks, que tienen carga fraccionaria, se distinguen entre sí por una propiedad cuántica conocida como sabor y se enlazan mutuamente formando diferentes combinaciones para constituir las partículas del núcleo atómico: el protón (que tiene una estructura compuesta representada por las letras *uud*) y el neutrón (*udd*).

La descripción cabal de todas las partículas subatómicas conocidas, incluidas las que se observan sólo fugazmente en los aceleradores de alta energía, requiere más constituyentes fundamentales. Se conocen seis tipos de leptones, que se alinean de manera natural en tres dobletes o parejas. Hasta hace poco se habían acreditado también cuatro tipos de quarks, formando dos dobletes similares. Además de los quarks *u* y *d* de la materia ordinaria, se necesita un segundo par de quarks para incorporar los sabores especiales conocidos como extrañeza (*s*) y encanto (*c*). Este artículo resume las pruebas experimentales acerca de un quinto tipo de quark: el quark "fondo" (*bottom*), *b*, que incorpora el sabor denominado belleza.

La primera indicación acerca de la existencia de quarks dotados de belleza nos llegó hace seis años, en experimentos donde se arrojaba un haz de protones de alta energía contra un blanco fijo. Entre los productos del bombardeo había cierto número de partículas de dos quarks masivas que parecían consistir en un nuevo quark, el quark *b*, ligado a su propia antipartícula, el quark $\bar{b}$. En tal partícula, los sabores opuestos se anulaban y la partícula resultaba carente de sabor; en otras palabras, las partículas observadas se estimaron de belleza oculta, o encubierta.

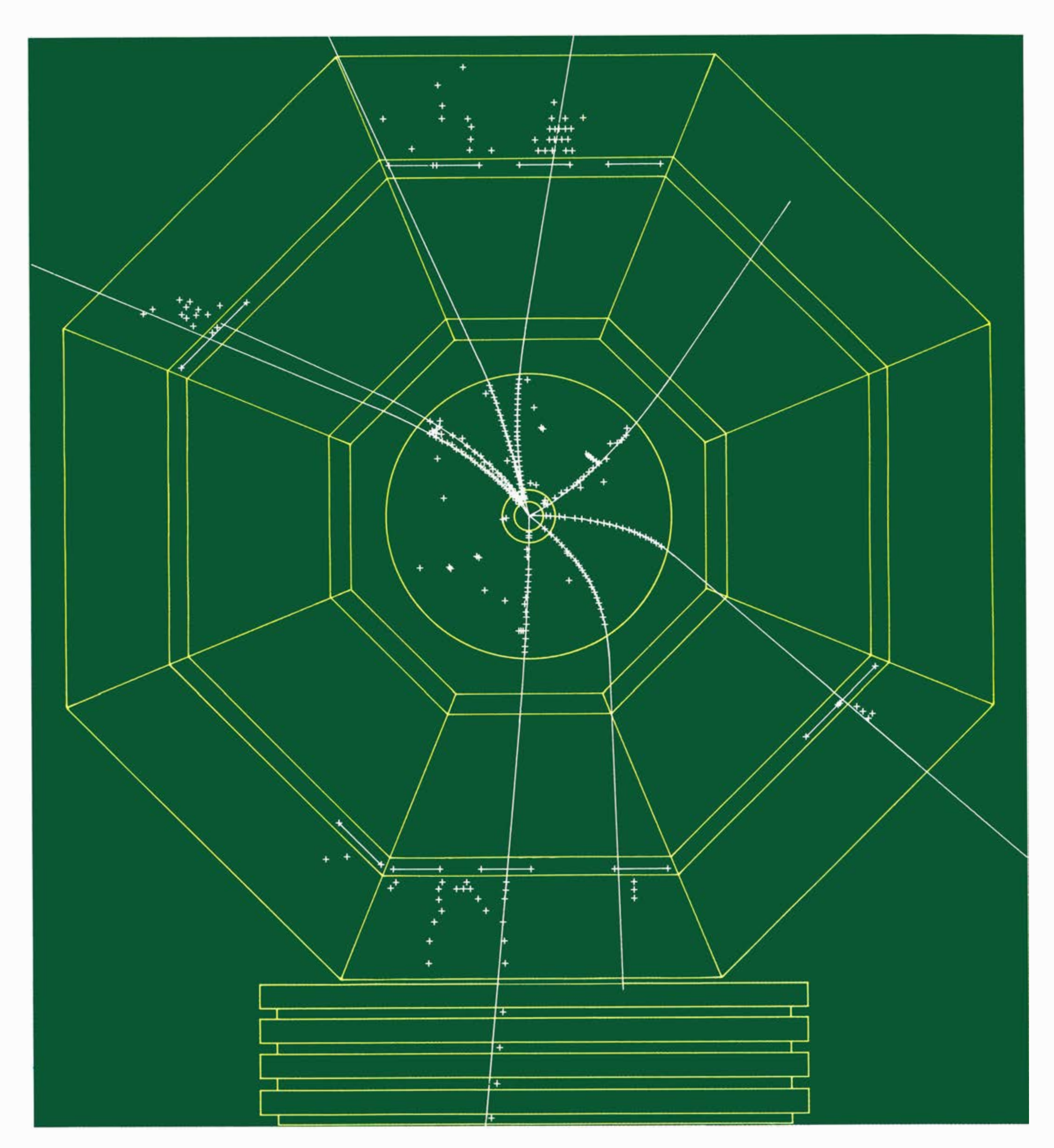
A lo largo de los últimos años, nuestro grupo, adscrito a la Universidad de Cornell, ha tomado otro camino en la búsqueda de partículas con belleza. En nuestros experimentos se provoca la colisión entre haces de electrones y positrones de alta energía, que avanzan en sentidos opuestos; las partículas colisionantes, materia y antimateria, se aniquilan mutuamente en una llamarada de radiación electromagnética a partir de la cual pueden nacer nuevas partículas. Este método nos ha permitido crear partículas en las cuales el quark *b* está manifiestamente ligado a un antiquark de sabor diferente. En dichas partículas, la belleza ya no está oculta; decimos, por contra, que está desnuda. Se espera que la observación de partículas con belleza desnuda aporte información sobre las relaciones entre las partículas fundamentales. Se espera también prestar renovada atención a la búsqueda de otro quark más para completar el tercer doblete de quarks. El predicho, pero aún no observado, sexto quark está etiquetado como cima (*top*), o quark *t*, y su sabor recibe el nombre de "verdad" (*truth*). Antes de contar la historia del descubrimiento del quark dotado de belleza vamos a revisar con algún detalle la evolución de la descripción leptón/quark de la materia.

Los tres dobletes leptónicos son, respectivamente, el electrón ($e-$) y su compañero sin carga, el neutrino electrónico (ν_e), el muon (μ^-) y su neutrino (ν_μ), y la tau (τ^-) y su neutrino (ν_τ). Por cada leptón existe un antileptón, de manera que la entera relación de miembros de esta clase incluye también al positrón (e^+) y su antineutrino ($\bar{\nu}_e$), el muon positivo (μ^+) y su antineutrino ($\bar{\nu}_\mu$), y la tau positiva (τ^+) y su antineutrino ($\bar{\nu}_\tau$). Los leptones son muy pequeños, de diámetro inferior a 10^{-15} centímetros; se trata, a buen seguro, de partículas puntuales. Aunque los leptones cargados se comportan de manera parecida, sus masas son bastante diferentes: la masa del muon es 206 veces mayor que la del electrón, en tanto que la partícula tau tiene una masa 3500 veces mayor que la del electrón. Los neutrinos son muy ligeros; puede que carezcan realmente de masa.

Cada doblete de quarks (*u* y *d*, *s* y *c*, *b* y *t*) está formado por un quark con carga 2/3 y otro con carga $-1/3$. Como los leptones, los quarks parecen ser muy pequeños. Suele considerárseles también objetos puntuales. De nuevo aquí, por cada quark hay un antiquark, con carga opuesta y sabor contrario. Por ejemplo, mientras el quark *b* tiene carga $-1/3$ y -1 unidades de belleza, su antiquark, el $\bar{b}$, tiene carga $+2/3$ y $+1$ unidades de belleza.

Ante esas 24 unidades constituyentes (leptones, antileptones, quarks y antiquarks) merece la pena destacar que, en la mayoría de circunstancias, la materia se construye con sólo un doblete leptónico (e^-, ν_e) y un doblete de quarks (*u, d*). Además de las tres partículas fundamentales ya mencionadas como principales constituyentes de la materia ordinaria, el cuarto miembro de estos dos primeros dobletes, el neutrino electrónico, lo emite la materia como subproducto de la radiactividad natural.

Los quarks se enlazan en otras combinaciones para formar muchas partículas, amén de protones y neutrones. Existen dos posibles tipos de combinaciones: grupos de tres quarks, llamados bariones, y parejas quark-antiquark, llamadas mesones. Juntas, ambas clases de partículas formadas por quarks reciben el nombre de hadrones. No obstante su exigüa magnitud, los hadrones no son puntuales. Su diámetro,



1. MESONES DOTADOS DE SABOR BELLEZA (es decir, partículas formadas por dos quarks, uno solo de los cuales porta dicha propiedad). Ellos han provocado la figura de trayectorias de partículas representada en blanco en este dibujo generado por ordenador, que ha recreado Allen Beechel. Las trayectorias arrancan de una colisión frontal entre un electrón y un positrón. Las partículas colisionantes, materia y antimateria, fueron aceleradas en sentidos opuestos dentro de la cámara circular de vacío del Anillo de Almacenamiento de Electrones de Cornell (CESR). La colisión tuvo lugar dentro del detector CLEO, uno de los dos macrosistemas de identificación de partículas colocados en los puntos de interacción donde se cruzan los dos haces que giran en sentidos opuestos. (Un plano del acelerador y una representación tridimensional del detector CLEO se reproducen y explican en la figura 5.) La aniquilación mutua de un electrón y un positrón produce un pulso de radiación electromagnética, de la que, al instante, se materializa un masivo e inestable mesón, llamado hypsilon (Y'''), formado por un quark con belleza (b) ligeramente enlazado a su propio antiquark ($\bar{b}$). En la consiguiente desintegración del Y''' se forman dos mesones con belleza, designados B y $\bar{B}$, que, a su vez, se desintegran en un surtido de otras partículas. El paso de productos de desintegración eléctricamente cargados a través de varias partes del detector quedó registrado en una figura de puntos (*cruces blancas*). Ajustando las trayectorias a los puntos, un programa de ordenador para el reconocimiento de figuras determina la dirección y momento de cada partícula y, en algunos casos, identifica el tipo de partícula. Por ejemplo, la trayectoria de las seis (si el dibujo fuera un reloj) se atribuyó a un muon extremadamente penetrante en razón de la hilera de puntos registrada en un conjunto especial de cámaras de detección situadas fuera del detector. La trayectoria de las 12 se identificó como un probable electrón, de acuerdo con la información grabada relativa a la tasa con que depositaba energía en un conjunto interno de cámaras, junto con la significativa figura de "lluvia" que dejaba en la cámara de lluvia electromagnética situada en la cima del detector. Un análisis completo de tales sucesos de colisión depende de los datos de todos los componentes del detector, que habría de incluir, por consiguiente, algunos que no mostramos aquí.

CARGA	DOBLETES LEPTONICOS		DOBLETES ANTILEPTONICOS		CARGA
0	NEUTRINO ELECTRONICO	ν_e	$\bar{\nu}_e$	ANTINEUTRINO ELECTRONICO	0
−1	ELECTRON	e^-	e^+	POSITRON	+1
0	NEUTRINO MUONICO	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	ANTINEUTRINO MUONICO	0
−1	MUON NEGATIVO	μ^-	μ^+	MUON POSITIVO	+1
0	NEUTRINO TAUONICO	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	ANTINEUTRINO TAUONICO	0
−1	TAU NEGATIVA	τ^-	τ^+	TAU POSITIVA	+1

CARGA	DOBLETES DE QUARKS		DOBLETES DE ANTIQUARKS		CARGA
+2/3	ARRIBA	u	$\bar{u}$	ANTIARRIBA	−2/3
−1/3	ABAJO	d	$\bar{d}$	ANTIABAJO	+1/3
+2/3	ENCANTADO	c	$\bar{c}$	ANTIENCANTADO	−2/3
−1/3	EXTRAÑO	s	$\bar{s}$	ANTIEXTRAÑO	+1/3
+2/3	CIMA (VERDAD)	t	$\bar{t}$	ANTICIMA (ANTIVERDAD)	−2/3
−1/3	FONDO (BELLEZA)	b	$\bar{b}$	ANTIFONDO (ANTIBELLEZA)	+1/3

2. LEPTONES Y QUARKS, las dos clases de partículas indivisibles y puntuales que se consideran hoy constituyentes últimos de la materia, se alinean de manera natural en pares llamados dobletes. Los leptones, que tienen cargas enteras (−1, +1 o 0), se observan de manera rutinaria en el laboratorio. Los quarks, de carga fraccionaria, no se han observado aislados; al parecer existen sólo como constituyentes de partículas compuestas conocidas con el nombre colectivo de hadrones. Por cada leptón, o quark, existe el correspondiente antileptón, o antiquark, con la misma masa, aunque de carga y sabor opuestos.

cercano a los 10^{-13} centímetros, revela una estructura compuesta. A causa de la intensidad de la fuerza que los une, los quarks no se detectan aislados. Los físicos llegan al conocimiento de los quarks a través del estudio de los hadrones. Se habla de más de 100 hadrones diferentes, aunque la mayoría sólo aparecen en colisiones de alta energía producidas por aceleradores.

De las cuatro fuerzas de la naturaleza, tres –la fuerte, la electromagnética y la débil– desempeñan un papel importante en las interacciones entre leptones y quarks. La cuarta fuerza, la gravedad, importante en el mundo macroscópico, carece de relevancia en la escala de quarks y leptones. De acuerdo con la visión moderna de las fuerzas, dos partículas entran en acción mutua por intercambio de ciertas entidades llamadas bosones de aforo. Los objetos intercambiados se comportan en cierto modo como las partículas, pero no tienen masas bien definidas y sólo existen muy brevemente.

La fuerza fuerte interviene sólo entre quarks; se transmite a través de bosones de aforo llamados gluones, así denominados porque son la "cola" (*glue*, en inglés) que mantiene unidos los quarks dentro de los hadrones. La fuerza electromagnética actúa entre pares de partículas cargadas; se transmite mediante el fotón, que es el cuanto, carente de masa, de la radiación electromagnética. La fuerza débil afecta tanto a los quarks como a los leptones; se transmite con los bosones de aforo designados por W^+, W^- y Z^0 (también conocidos como bosones vectoriales intermedios). Como la fuerza fuerte es la de mayor intensidad de las tres, desempeña un papel predominante en los procesos que afectan a quarks y hadrones, a menos que, por alguna razón, quede inhibida. Por contra, la poca intensidad de la fuerza débil, en el rango de energías que corrientemente se examina, asegura que sólo sea significativa cuando las interacciones electromagnética y fuerte quedan eliminadas. Si la energía disponible crece, la fuerza débil se robustece, hasta terminar por adquirir la intensidad de las demás fuerzas.

Los bosones de aforo asociados a las fuerzas respectivas se comportan como agentes suyos en todos los procesos donde intervienen dichas fuerzas. El enlace fuerte de un quark d y otro $\bar{u}$ para formar un pion negativo, mesón π^-, por ejemplo, se atribuye al intercambio de gluones entre los dos quarks. Del mismo modo, la fuerza electromagnética entre dos electrones queda mediada por el intercambio de fotones. Otro tipo de interacción electromagnética se observa cuando un electrón y un positrón colisionan y se aniquilan entre sí para formar un fotón, que, rápidamente, se materializa en un muon positivo y un muon negativo. La interacción débil es responsable de procesos tales como la desintegración de un leptón tau, en que la tau se transforma en un neutrino tauónico emitiendo un bosón W^-. El W^-, a su vez, se desintegra en un muon negativo y un antineutrino muónico.

Los quarks y leptones más pesados son inestables. Se desintegran produciendo quarks y leptones más ligeros. La desintegración de un quark implica un cambio en el sabor. Los gluones y fotones, insensibles al sabor, no pueden causar tales cambios; por tanto, las desintegraciones de quarks y leptones se catalogan entre las interacciones débiles. En la desintegración de un quark s, por ejemplo, el s se convierte en un quark u cuando emite un W^-. El W^-, a su vez, puede materializarse en varios pares de partículas; verbigracia, en un electrón y un antineutrino electrónico. Cabría esperar también ver desintegrarse un quark s dando un quark d cuando el quark s emitiese un Z^0 (el duplicado neutro de los W^+ y W^-), que podría, entonces, desintegrarse en un electrón y un positrón. Búsquedas cuidadosas han mostrado que tales procesos involucrando al Z^0 no existen.

La necesidad de incorporar este hecho experimental dentro de la teoría condujo a la hipótesis según la cual el quark s es el miembro de carga $-1/3$ de un doblete con un quark de carga 2/3, con un nuevo sabor denominado encanto. Con dos dobletes de quarks, la interacción entre ellos es tal que la probabilidad de desintegración de un quark s en un quark no extraño por la emisión de un Z^0 se anula. Fundándose en esto, la existencia del quark c se predijo hace casi veinte años, diez antes del dramático descubrimiento de las partículas psi (ψ), que son mesones compuestos de un quark c y un antiquark $\bar{c}$. Este mecanismo para suprimir ciertos procesos que cambian la extrañeza puede generalizarse a otros sabores. En particular, si el quark b comparte un doblete con un quark t, los procesos que cambian la belleza e involucran un Z^0 están prohibidos. Pero si no hay tal quark t, estos procesos deben ocurrir.

Después del descubrimiento del quark encantado en 1974, la descripción leptón/quark de la materia parecía asentarse en una sólida posición. Los dos dobletes leptónicos y los dos de quarks conocidos por entonces daban cuenta precisa de todas las partículas conocidas. No había razón convincente

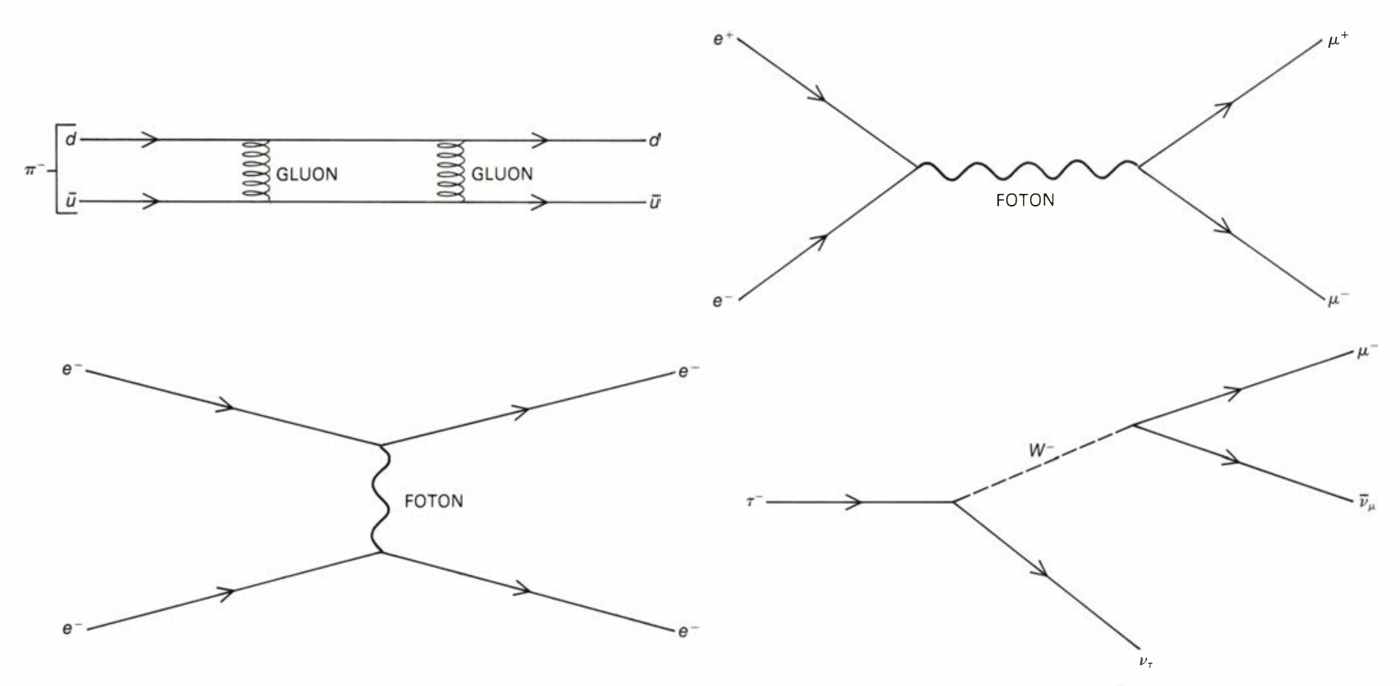
alguna para esperar otros leptones o quarks. Hasta que el descubrimiento del leptón tau, en 1975, planteaba la posibilidad de otros quarks [véase "Leptones pesados", por Martin L. Perl y William T. Kirk; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1978]. No tardaron en llegar pruebas a favor de un quinto quark. La verdad es que se observa un estrecho paralelismo entre el descubrimiento del quark c y el del b.

La primera prueba se obtuvo en un experimento realizado en 1977 por un grupo de físicos experimentales del Fermi National Accelerator Laboratory. Dirigidos por Leon M. Lederman, entonces en la Universidad de Columbia, los físicos bombardearon un blanco de cobre con un haz de protones a una energía de 400GeV (400.000 millones de electronvolt) y buscaron los muones producidos en las colisiones. Al observar un par de muones con carga opuesta, pensaron en la posibilidad de que una nueva partícula se hubiese creado para desintegrarse a continuación en un par $\mu^+ \mu^-$. Midieron el momento y la dirección de cada uno de los muones, para así determinar la masa de la nueva partícula. La distribución de masa que obtuvieron mostraba un ancho pico a 10 GeV, lo que revelaba la presencia de una nueva partícula, que fue llamada hypsilon (Y). Lederman y sus colegas interpretaron la forma de su pico como señal del ayuntamiento de dos o más picos estrechos (probablemente tres), favorecido por la limitada precisión experimental [véase "La partícula hypsilon", por Leon M. Lederman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1978).

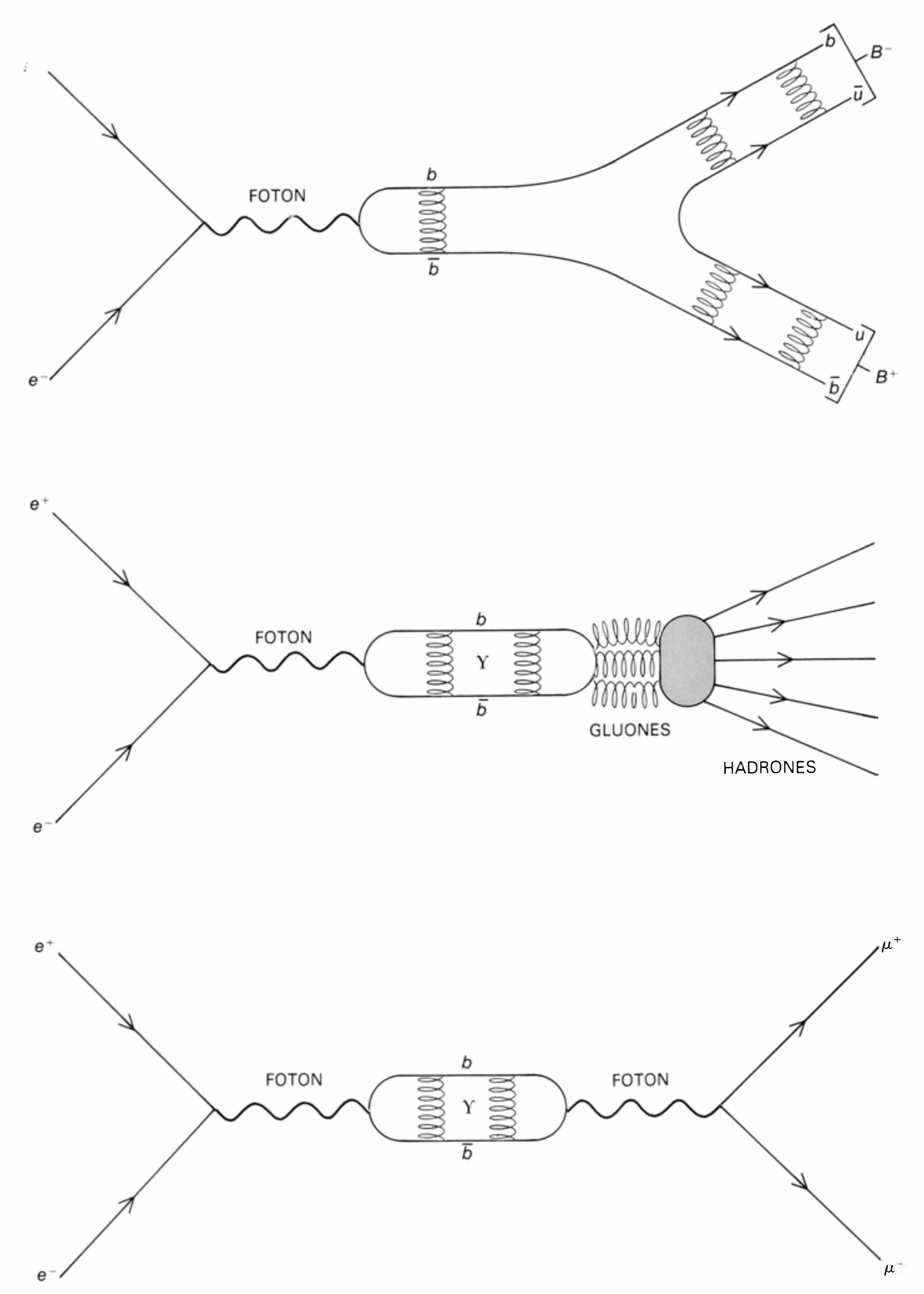
La desintegración de la nueva partícula en una pareja $\mu^+ \mu^-$ es un proceso electromagnético. Si la hypsilon pudiera desintegrarse mediante una interacción fuerte que actuara con toda su intensidad, las desintegraciones electromagnéticas serían, en comparación, insignificantes y no se hubiese detectado la desintegración en $\mu^+ \mu^-$. Observarla sugirió que la desintegración fuerte de la hypsilon estaba en cierto modo inhibida. Se vio que si la hypsilon era un mesón compuesto por un nuevo quark y su antiquark ($b\bar{b}$), tal supresión se justificaba: con suficiente energía, los quarks b y $\bar{b}$ del mesón podrían separarse, creando una nueva pareja quark-antiquark y produciendo mesones dotados de belleza, por ejemplo $b\bar{u}$ y $\bar{b}u$.

Esta última desintegración es un proceso mediado por la interacción fuerte y no estaría suprimido si estuviese energéticamente permitido. La supresión observada sugiere que hay demasiado poca energía disponible para este proceso; en otras palabras, la masa de la hypsilon es inferior a la suma de las masas de los dos mesones con belleza. El único mecanismo alternativo para una desintegración fuerte es la aniquilación mutua de los quarks b y $\bar{b}$ para producir hadrones. Se sabe que este tipo de aniquilaciones, aunque mediadas por la interacción fuerte, están suprimidas. Lo cierto es que, por mor de esta supresión, la desintegración electromagnética se torna importante. En el proceso electromagnético los quarks b y $\bar{b}$ se aniquilan mutuamente formando un fotón, que se materializa en una pareja $\mu^+ \mu^-$.

Se presume que la supresión de la desintegración fuerte dará lugar a una vida media para la hypsilon bastante más dilatada que los 10^{-23} segundos de vida media para un hadrón típico con desintegración fuerte. Intervalos temporales de este orden son todavía demasiado breves para poderse medir directamente, pero pueden determinarse a partir de una relación entre la vida media de una partícula y la precisión con que se mide su masa. Si una partícula tiene una vida infinita, su masa puede determinarse con toda exactitud. Si su vida media es muy breve, las medidas de su masa darán una distribución



3. TRES FUERZAS importantes en la interacción de las partículas subatómicas operan mediante el intercambio de partículas intermediarias llamadas bosones de aforo. En estos diagramas esquemáticos que muestran cómo actúan tales fuerzas, el tiempo avanza de izquierda a derecha. El gluon, bosón de aforo de la fuerza fuerte, es el responsable del enlace de los quarks para la formación de hadrones; en el presente caso, el quark d y el quark $\bar{u}$, que constituyen un pion negativo, o mesón π^-, están estrechamente unidos por el intercambio periódico de un gluon (*diagrama superior izquierdo*). El fotón, que es el cuanto sin masa de la radiación electromagnética, sirve de portador de la fuerza electromagnética; por ejemplo, cuando dos electrones se aproximan, interaccionan electromagnéticamente intercambiando un fotón (*diagrama inferior izquierdo*). En otro tipo de interacción electromagnética, un electrón y un positrón colisionan y se aniquilan mutuamente para formar un fotón, que puede entonces materializarse en nuevas partículas: un par muon-antimuón (*diagrama superior derecho*). Los leptones y quarks se desintegran mediante la interacción débil. Así, cuando un leptón tau negativo se desintegra, se transforma en un neutrino tauónico, emitiendo un bosón vectorial intermedio etiquetado como W^-; el W^-, uno de los tres portadores de la fuerza débil, se desintegra en varias posibles combinaciones de partículas, por ejemplo, en un muon negativo y un antineutrino muónico (*abajo, derecha*).



4. SE CREAN QUARKS CON BELLEZA en colisiones electrón-positrón cuando el fotón resultante de la aniquilación de las dos partículas que colisionan se materializa en un par $b\bar{b}$. Si hay suficiente energía, se puede crear un par quark-antiquark adicional y los quarks b y $\bar{b}$ aparecen en combinación con los otros quarks como mesones con belleza (*arriba*). A energías más bajas, en que es imposible producir los dos mesones, el par $b\bar{b}$ se crea como sistema ligado: el mesón hypsilon. Al no poder separarse, los quarks se aniquilan mutuamente de dos maneras. En primer lugar, mediante la interacción fuerte, con emisión de gluones: los gluones, a su vez, originan, mediante un proceso del que apenas sabemos algo, hadrones, que se observan en los resultados de la desintegración (*centro*). Este tipo de desintegración, aun cuando es un proceso regido por la interacción fuerte, queda inhibido, con el resultado de que la desintegración electromagnética de la hypsilon se hace, en comparación, importante. En este último tipo de desintegración, el par $b\bar{b}$ se aniquila dando un fotón, que puede formar, entre otras cosas, un par muon-antimuón (*abajo*).

con una anchura relacionada con el valor de la vida media; para un hadrón normal con desintegración fuerte, la anchura en la distribución de masa es equivalente a un rango de energías de cerca de 0,15GeV. El experimento de Lederman no tenía una resolución suficiente para medir la anchura de los picos de la distribución de masa de la hypsilon; semejante determinación habría de esperar la llegada de una técnica distinta.

La técnica de colisiones que posibilitó el descubrimiento de la familia de la hypsilon no era la idónea para abordar un detallado estudio de estas partículas. Las hypsilon se crean rara vez en las colisiones protón-núcleo, y cuando ocurre, están habitualmente acompañadas por muchas otras partículas, lo que dificulta el proceso. Para investigar la familia hypsilon, y el quark b en general, resulta más adecuado emplear la técnica en que haces de electrones y positrones se hacen colisionar mutuamente. A veces, un electrón y un positrón se aniquilan entre sí y crean un fotón que puede materializarse en una pareja quark-antiquark, como $b\bar{b}$. Cuando la energía del electrón y la del positrón suman más que la masa de la partícula hypsilon, aumenta la probabilidad para la formación de un par $b\bar{b}$, que puede enlazarse para producir una hypsilon. Como las hypsilon se desintegran ante todo en hadrones, la estrategia experimental aconseja variar la energía de los haces electrón-positrón que colisionan y medir la tasa en la formación de hadrones. Esta técnica había sido usada antes en el anillo SPEAR de almacenamiento electrón-positrón, del Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), en el descubrimiento del mesón psi.

En 1978, se llevó a cabo un experimento para buscar la hypsilon con el anillo DORIS de almacenamiento electrón-positrón, en el Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) de Hamburgo. Las gráficas de la tasa de formación de hadrones en función de la energía mostraron dos agudas espigas alrededor de los 10 GeV; ello confirmaba los primeros datos sobre la existencia de dos o más estados hypsilon distintos. A pesar de forzarse el DORIS hasta el límite para alcanzar la energía del segundo estado hypsilon, no se pudo sacar más. Por esta razón el tercer posible estado hypsilon quedó fuera de alcance y, lo que es más importante, ocurrió lo mismo con todos los sistemas $b\bar{b}$ donde b y $\bar{b}$ no están estrechamente enlazados.

Resultaba imperioso averiguar si había o no un tercer estado ligado $b\bar{b}$ y si existía, para una energía ligeramente más alta, otra resonancia donde el b y el $\bar{b}$ estuvieran sólo ligeramente enlazados y se produjeran con energía suficiente para separarse y aparecer como partículas con belleza. Los teóricos habían ya predicho los niveles energéticos del sistema ligado $b\bar{b}$, basándose en pruebas obtenidas del estudio del sistema $c\bar{c}$ de los mesones psi. Correspondía ahora a los físicos experimentales confirmar o refutar la teoría y estudiar el comportamiento del quark b a través de sus desintegraciones e interacciones.

Se registraba por entonces una estimulante inquietud entre los físicos que

trabajan en la preparación del anillo de almacenamiento de electrones en Cornell (CESR). Este aparato, construido bajo la dirección de Boyce D. McDaniel y Maury Tigner, se diseñó en 1975, antes de conocerse la existencia de la hypsilon. Fue un golpe de suerte que el sistema hypsilon se encontrara justo en medio del rango de energías planeado para el CESR. Desde que entró en funcionamiento en abril de 1979, ha sido en ese anillo de almacenamiento donde se ha realizado la mayor parte del trabajo sobre el quark *b*.

En el CESR, un "chorro" de más de 10^{11} electrones y otro del mismo número aproximado de positrones viajan en sentidos opuestos en un anillo cuya circunferencia mide 768 metros. Los chorros circulan dentro de una cámara de vacío de forma toroidal, mantenida a la presión de 10^{-8} torr (10^{11} veces menor que la presión atmosférica). Imanes de curvatura y focalización confinan las partículas en un camino circular dentro de la cámara de vacío y mantienen el tamaño y forma de los chorros. Un suministro constante de energía a los haces compensa la que se pierde por radiación. Debido a la baja densidad de los electrones y positrones en los chorros, se producen muy pocas colisiones frontales cada vez que se cruzan. El alto número de cruces (400.000 por segundo) asegura, sin embargo, una adecuada tasa de aniquilaciones electrón-positrón. En el argot de los físicos de partículas estas colisiones son "sucesos". Los sucesos hadrónicos, aquellos en los que los productos de colisión incluyen hadrones, se observan, varios, cada minuto.

El estudio detallado de la producción y desintegración de quarks *b* requiere la observación y estudio de cientos de miles de sucesos hadrónicos. Estos sucesos ocurren en una baja proporción, de ahí que los experimentadores deban asegurarse que sus detectores sean capaces de registrar cualquier colisión interesante. Además, el detector no dejará pasar por alto las muchas partículas creadas en los sucesos, ya que podrían ser cruciales para desentreñar cuanto ocurre en la producción y desintegración de nuevas partículas.

Se ha empeñado mucho tesón y esfuerzo en el proyecto y construcción de sistemas para detectar y estudiar los productos de tales interacciones. Los retos son formidables. Los sucesos producen muchas partículas, cargadas y neutras, que salen proyectadas en todas direcciones. La propia escasez de sucesos interesantes confiere un papel esencial al rendimiento. Los detectores deben medir y registrar partículas que atraviesan la zona de detección en milmillonésimas de segundo. En el CESR, los haces de electrones y positrones se cruzan en dos regiones de intersección diametralmente opuestas. Los detectores que rodean los respectivos puntos de cruce reflejan dos puntos de vista diferentes en el diseño de sistemas de detección para tales experimentos de colisión de haces.

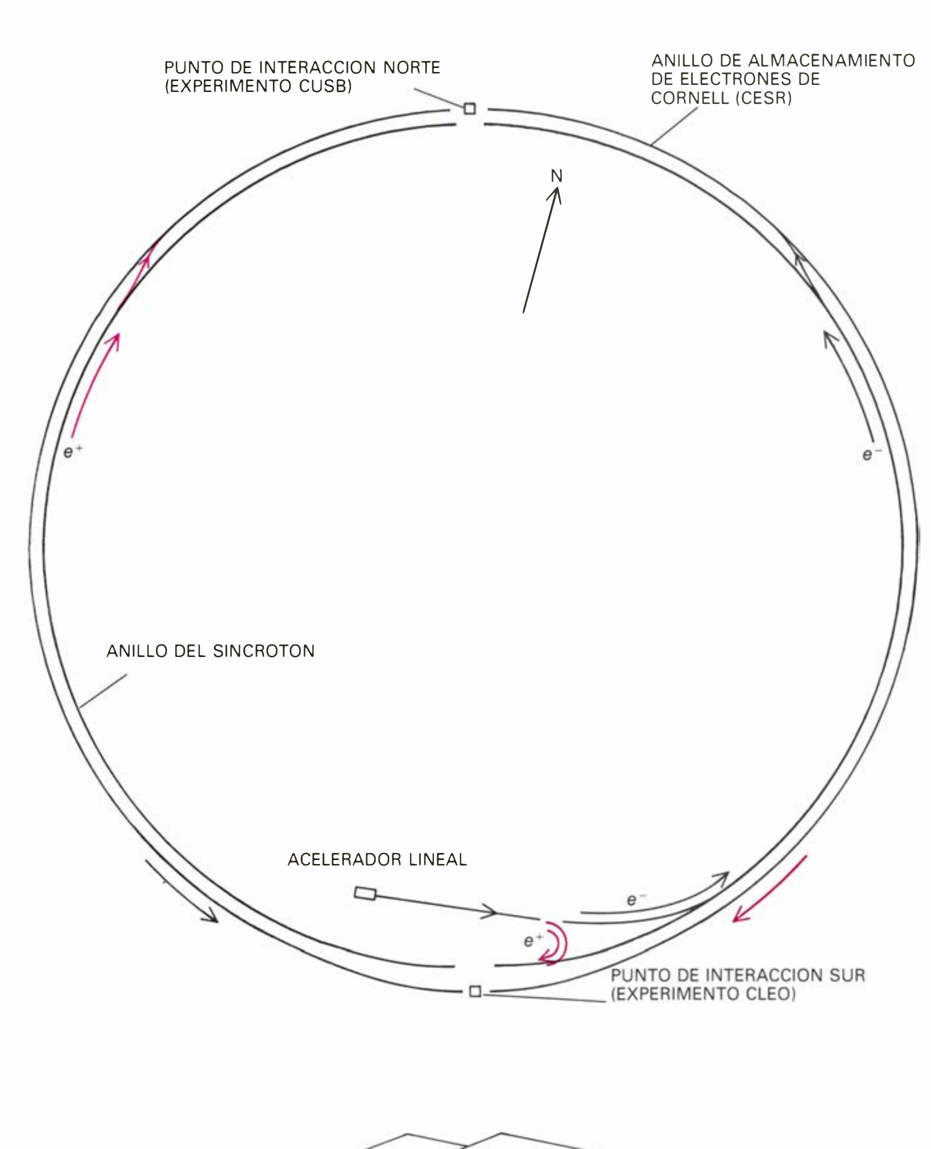
Ocupando la región sur de interacción en el CESR, encontramos a CLEO, un detector de carácter general construido y operado por un grupo de 75 físicos (contándonos a nosotros tres) procedentes de varias instituciones universitarias: Cornell, Harvard, estatal de Ohio, Rochester, Rutgers, Syracuse y Vanderbilt. Se erigió para proporcionar la máxima información posible acerca de cada suceso. Vale decir: detectar las partículas cargadas y medir su momento, medir la energía y dirección de los fotones e identificar tipos específicos de partículas, como piones, kaones (mesones con sabor *s*), protones, electrones y muones. Como las partículas pueden salir en todas direcciones, hubo que rodear el punto de intersección, cuanto fue posible, con componentes del detector. De donde se infieren sus dimensiones: ocupa un espacio de seis metros de largo por ocho de ancho y nueve de alto, y pesa casi 1,5 millones de kilogramos (1500 toneladas métricas). Un cuidadoso análisis computerizado de las miles de mediciones realizadas por los distintos componentes facilita una comprensión clara de lo que ocurre en determinados sucesos de aniquilación.

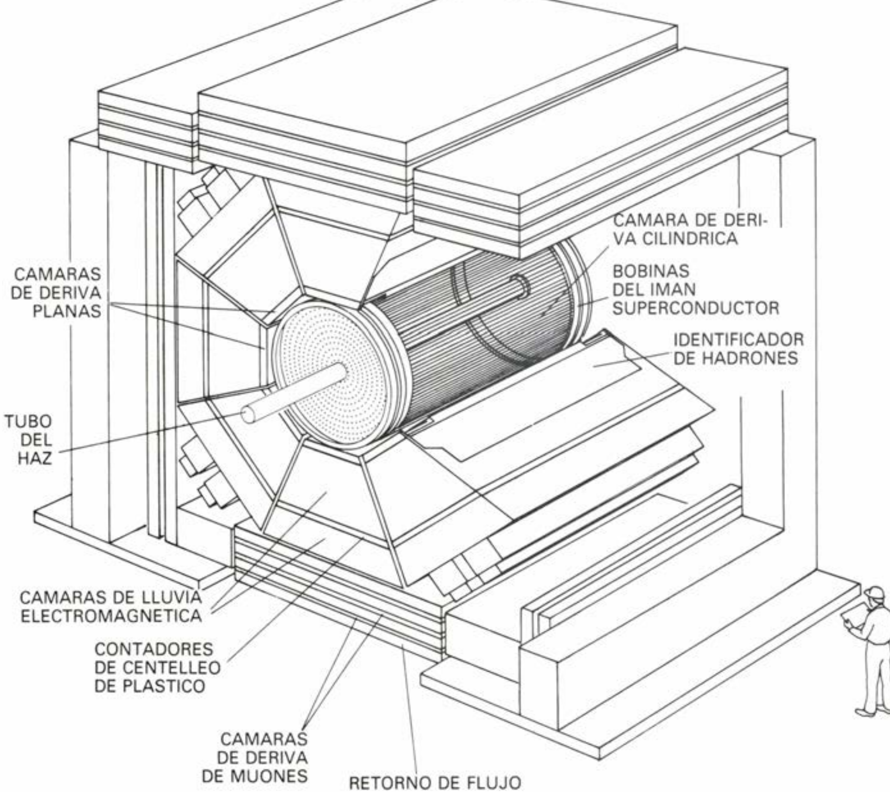
El corazón de CLEO es un imán solenoidal superconductor, de un metro de radio por tres de largo. El interior del imán posee un detector cilíndrico, llamado cámara de deriva, que rastrea las partículas cargadas en cuanto emergen de la colisión. Se registran 17 mediciones distintas de la posición de cada partícula cargada, permitiendo a los experimentadores trazar la trayectoria de la partícula. Midiendo la curvatura del camino en el campo magnético, se determina el momento de la partícula. El proceso de detección y reconstrucción de la ruta constituye una fase crucial del trabajo realizado en CLEO.

Fuera de la bobina del imán solenoidal encontramos componentes que sirven para identificar diferentes tipos de partículas cargadas. Hay un conjunto de contadores de centelleo de plástico, que emiten un breve pulso de luz cuando una partícula cargada los atraviesa. Una medida precisa del tiempo del pulso, en combinación con un conocimiento exacto del instante en el cual cruza el haz, permite calcular el tiempo que una partícula ha necesitado para viajar desde la colisión hasta el contador. A partir de este intervalo se deduce la velocidad de la partícula. La medición de la velocidad, combinada con el momento medido por la cámara central de deriva, conduce a determinar la masa de la partícula. Con estos presupuestos, se discrimina entre piones, kaones y protones.

En la estructura original del detector CLEO, la velocidad de una partícula se medía también con un conjunto de contadores Cerenkov, que detectan la luz emitida cuando una partícula que los atraviesa rebasa la velocidad de la luz en el gas con el que se han llenado los contadores (en este caso, la partícula actúa como un avión que atraviesa la barrera del sonido). Los contadores Cerenkov, de probada utilidad para identificar electrones, se han substituido por detectores de gas que miden la proporción de energía perdida por cada partícula cargada cuando viaja a través de dicho fluido. La información obtenida puede combinarse con la medida del momento de la partícula para dar la velocidad de la partícula y, de aquí, su masa. De esta manera, los protones, piones, kaones y electrones pueden identificarse independientemente.

Los electrones ven confirmada su identidad, además, en otra parte del detector. Al atravesar materia, el electrón pierde energía, produciendo lo que se llama una lluvia electromagnética. El proceso empieza cuando un electrón rápido es desviado por un núcleo y emite un fotón energético. Cuando el fotón pasa cerca de otro núcleo produce un par electrón-positrón. El electrón y el positrón, a su vez, emiten fotones; el proceso continúa con la producción de una lluvia de electrones, positrones y fotones secundarios hasta que toda la energía queda absorbida. El detector de lluvia electromagnética del CLEO está construido con capas de plomo (para ofrecer el medio donde se producirán las lluvias), alternadas con detectores de partículas cargadas (para determinar la energía y alcance de la lluvia mientras se desarrolla). Se analizan la forma y la energía de las lluvias asociadas a las trayectorias procedentes del punto de





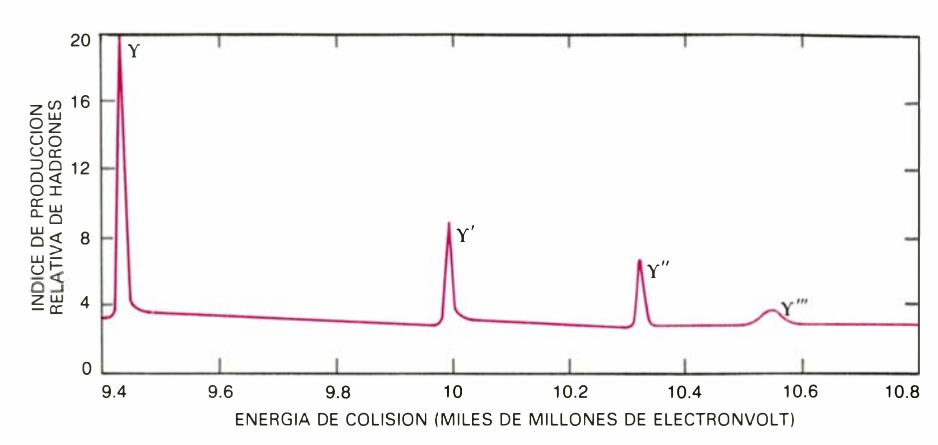
colisión para identificar los electrones. Las lluvias no asociadas a trayectoria alguna se presumen de fotones.

La detección de muones se basa en su capacidad de atravesar grandes espesores de material. Un hadrón que atraviesa la materia acabará por intervenir en una interacción fuerte; un electrón, generará una lluvia; un muon, sin embargo, perderá energía muy lentamente y podría viajar por gran cantidad de material sin detenerse. Para sacarle partido a esa característica, CLEO está rodeado por un absorbente de acero de cerca de un metro de grosor. Recubren el exterior de acero cámaras de deriva planas que detectan cuantas partículas cargadas surgen del absorbente. La partícula cargada que se observa atraviesa el acero se la considera muon.

El detector CUSB, situado en la región norte de intersección del CESR, fue diseñado con un propósito especial: servir de detector de fotones de alta resolución. Colaboraron en su proyecto físicos de la Universidad de Columbia, estatal de Louisiana, el Instituto Max Planck de Física y Astrofísica de Munich y la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook. Su principal componente es un conjunto de detectores de lluvia, que consisten en cristales de yoduro de sodio. Estos detectores permiten obtener medidas precisas de la energía de los fotones. El CUSB está dotado para medir energías del fotón en el presunto rango característico de las transiciones entre los estados hypsilon. Los detectores de fotones del CUSB sirven también para identificar lluvias electrónicas. Cerca del punto de colisión, el CUSB tiene cámaras de trayectoria para detectar partículas cargadas. Ciertas partes del detector están rodeadas por absorbentes de acero y por contadores para la detección de muones.

5. LUGAR DEL DESCUBRIMIENTO de los mesones con belleza, mostrado en dos escalas distintas en este par de dibujos. El plano superior esboza el despliegue general del CESR. Los electrones y positrones se aceleran primero en un acelerador lineal y luego en un anillo sincrotrón antes de ser inyectados en el anillo de almacenamiento. Las partículas quedan confinadas en "chorros" separados, que circulan en sentidos opuestos y se cruzan en dos puntos de interacción diametralmente antagónicos, donde se han instalado los detectores para estudiar los productos de las aniquilaciones electrón-positrón. La vista tridimensional inferior muestra la estructura del detector CLEO. Un imán solenoidal superconductor establece un fuerte campo magnético en la cámara central cilíndrica, donde el momento de cada partícula cargada se determina a partir de la curvatura de su trayectoria. Se han montando otros aparatos de detección en ocho módulos idénticos que rodean la región central del campo magnético y en varios equipos exteriores.

El estudio de la física del quark b empezó, en el CESR, a finales de 1979. No tardaron en descubrirse las resonancias Y, Y′ e Y″ de la partícula hypsilon, tanto en el CLEO como en el CUSB, por medición de la razón de producción de hadrones en función de la energía. Las tres resonancias aparecieron como estrechos picos a las energías respectivas de 9,46, 10,02 y 10,35 GeV. Era la primera vez que Y″ se observaba como resonancia independiente, hecho que se anunció al mundo de la física de altas energías como felicitación navideña. Desde esa fecha, dichas resonancias han sido objeto de estudio cuidadoso en la observación de centenares de miles de sucesos. Se hallaron varias transiciones entre los niveles energéticos, transiciones raras que, al identificarlas, se pudo establecer la espectroscopía completa del sistema hypsilon.



6. FAMILIA HYPSILON DE RESONANCIAS, que representa varios niveles discretos de energía del mesón $b\bar{b}$ y es responsable de los picos de esta gráfica, sobre el índice total de producción de hadrones en función de la energía de los haces electrón-positrón que colisionan, registrado en el detector CLEO. Los picos *Y*, *Y′* e *Y″*, bastante finos, corresponden, pues, a estados $b\bar{b}$ estrechamente ligados, creados a energías por debajo del umbral de producción de mesones con belleza. El pico *Y‴*, más ancho que los otros tres, indica que el sistema $b\bar{b}$ a más alta energía puede desintegrarse produciendo un par $B\bar{B}$.

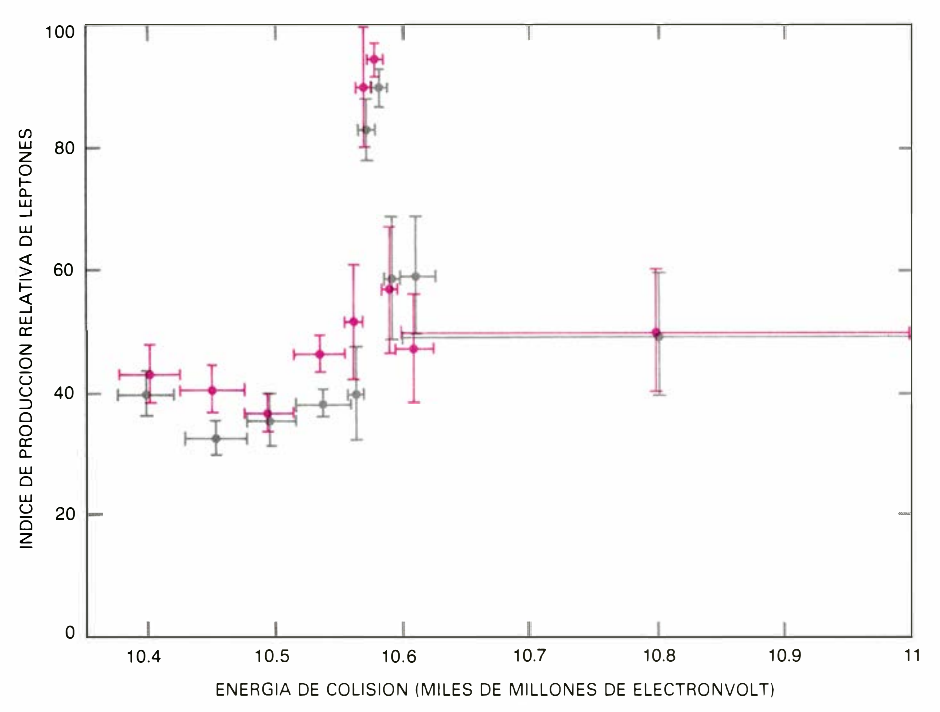
Las resonancias hypsilon Y, Y′ e Y″ son hadrones con belleza y con antibelleza; los sabores se anulan y dichos hadrones carecen de sabor. Por cuya causa se dice que estos hadrones tienen belleza oculta. Cuando uno de ellos se desintegra, lo hace por aniquilación mutua de los quarks b y $\bar{b}$; en este caso no puede examinarse la desintegración de los quarks b como tales. Para energías del par electrón-positrón mayores que la equivalente a la masa de los estados hypsilon, pueden producirse con suficiente energía los pares $b\bar{b}$, de manera que los dos quarks no queden ligados, permitiéndoles moverse uno lejos del otro. Cuando se separan, la interacción fuerte entre los quarks crea un par quark-antiquark ligero ($u\bar{u}$ o $d\bar{d}$). Los quarks se unen para formar un mesón B y otro $\bar{B}$ ($b\bar{u}$ y $\bar{b}u$, o $b\bar{d}$ y $\bar{b}d$). En el mesón B la belleza ya no está oculta. De esta partícula se dice que muestra belleza desnuda (o un "fondo" descubierto). A diferencia de la belleza oculta, la desnuda puede desintegrarse por una interacción débil. Por consiguiente, estudiando los mesones B dotados del sabor belleza se profundiza en las interacciones débiles del quark b.

Se creía, en un comienzo, que las resonancias hypsilon constituían tres estados de diferente energía del sistema ligado $b\bar{b}$. Parecía razonable esperar la existencia de otras resonancias por encima del umbral de desintegración en hadrones con belleza. Una expedición organizada en su búsqueda en la región energética por encima de la Y″ ofreció, a principios de 1980, la esperada resonancia, a 10,58 GeV. A diferencia de las tres primeras resonancias hypsilon, todas extremadamente estrechas, la cuarta resonancia, *Y‴*, era bastante ancha, lo que ponía de relieve que se desintegraba en B y $\bar{B}$ por el camino no suprimido; en otras palabras, era una fuente de partículas con belleza.

Para establecer sin ambigüedades que ésa era la interpretración correcta, hubo que encontrar pruebas de las partículas con belleza en la desintegración del *Y‴*. Como ya hemos visto, los quarks de un sabor sólo pueden desintegrarse en los de otro sabor a través de las interacciones débiles. Un tipo de inequívocas desintegraciones débiles son las desintegraciones "semileptónicas", en las que un mesón se desintegra en un muon y un electrón, conjuntamente con un neutrino y uno o más hadrones. CLEO estaba bien equipado para identificar muones y electrones; por su parte, los detectores de fotones del CUSB podían identificar electrones. En consecuencia, ambos grupos de investigadores se pusieron a medir qué proporción de leptones solos se producían en las desintegraciones de *Y‴*, para confirmar así la presencia de desintegraciones débiles de partículas con belleza.

Debido a la dificultad que entrañaba detectar leptones y a la baja proporción con que se acumulaban los sucesos de *Y‴*, pasó cierto tiempo antes de llegar a una conclusión definitiva acerca de la producción de dichas partículas ligeras. A lo largo de la primera mitad de 1980, se fue viendo con creciente nitidez que la proporción en la producción de leptones para sucesos a la energía del *Y‴* era significativamente mayor que en sucesos a energías próximas. Aun así, antes de aceptar la conclusión de que estábamos contemplando hadrones con belleza, había que considerar la posibilidad de que los leptones se produjeran por algún mecanismo diferente del de la desintegración débil del mesón B. La distribución de momentos del leptón observada era cualitativamente lo que se podía esperar de la desintegración de un mesón pesado como el B y no de la correspondiente a mesones más ligeros, con encanto. Como los leptones se producen uno a uno, y no en pares con cargas opuestas, no pueden resultar de un proceso electromagnético. Cuando se desecharon todas las explicaciones alternativas, la conclusión adquirió firmeza: estábamos viendo belleza desnuda.

Aunque la producción de leptones demostraba la presencia de belleza desnuda en la desintegración de *Y‴*, sabíamos poco del mesón B. Puesto que la *Y″* está por debajo del umbral de la desintegración $B\bar{B}$ y, la *Y‴*, por encima, la masa del mesón B debe encontrarse entre la mitad de la masa de la Y″ y la mitad de la masa de la *Y‴*, en la zona que va desde 5,18 GeV hasta 5,29 GeV. Para demostrar que el mesón B es un objeto real y medir su masa, hay que reconstruir uno a partir de los restos de un suceso de *Y‴*. Hacer esto requiere tomar las trayectorias de un suceso en diversas combinaciones y determinar si puede demostrarse que alguna combinación particular es producto de desintegración de un mesón B. No se trata de ningún procedimiento fácil, puesto que el mesón B se desintegra a menudo en un amplio número de partículas, algunas de las cuales son neutras, escapando a la detección. Otras emergen a lo largo del tubo del haz, por cuya



7. OTRA PRUEBA, esta vez más clara, de la producción de partículas con belleza en la desintegración de *Y'''*, dada en estas gráficas del índice de producción de leptones en las colisiones electrón-positrón en función de la energía de colisión. Un aumento drástico en el índice de producción de electrones (*en negro*) y de muones (*en color*) aparece a una energía equivalente a la masa de la resonancia *Y'''*. La *Y'''* se desintegra en varias combinaciones de productos que, a su vez, se desintegran en un leptón y otras partículas. Tales desintegraciones "semileptónicas" dan fe de un proceso débil y confirman que la resonancia *Y'''* se desintegra produciendo un par $B\bar{B}$. Los segmentos dan el rango del error experimental.

razón no se ven. Más aún, cada suceso tiene tanto el mesón B como el $\bar{B}$, de manera que el número de combinaciones incorrectas puede ser enorme.

Concentrándose en tipos de desintegración del B que involucran sólo unas pocas partículas, el grupo de CLEO acaba de apuntarse un éxito reciente en la reconstrucción de los mesones B. En una muestra de 150.000 sucesos recogidos a lo largo de un período de nueve meses, se buscaron las partículas con encanto conocidas por mesones D neutros, que se desintegran formando una pareja kaón-pion. En algunos casos, el D^o se producía directamente en la desintegración de un mesón B. En otros, el B se desintegraba en un estado cargado excitado del mesón encantado, que, a su vez, se desintegraba en un D^o y un pion cargado. El B reconstruido se había desintegrado siempre en un D^o o un estado cargado excitado y uno o dos piones cargados, dando un total de tres a cinco partículas cargadas y ninguna neutra. Esto está en señalado contraste con el típico B, que se desintegra en nueve partículas, tres de las cuales son neutras. Las masas de los 18 candidatos a partícula B se agrupan alrededor de 5,274 GeV.

Nuestra medición de la masa del B demuestra que el Y''', que está a 10,58 GeV, sobrepasa sólo en 0,03 GeV el umbral para la producción $B\bar{B}$ (dos veces la masa del B, es decir, 10,55GeV). Cuando la resonancia Y''' se desintegra en $B\bar{B}$, hay justo la energía suficiente para dar la masa de dos mesones; como resultado, se producen prácticamente en reposo y sin acompañamiento de partículas que confundieran al experimentador. Así, la Y''' es una auténtica "mina" ideal de donde sacar partículas con belleza: una fuente abundante de mesones B y un lugar abierto para observar y estudiar las desintegraciones de quarks b. Quedan muchas cosas de estas desintegraciones que nos gustaría explorar. Por ejemplo, importa saber cuánto tarda en desintegrarse el quark b y en qué lo hace. Si la historia sirve de guía, estos experimentos conducirán a un mayor conocimiento de las relaciones entre los diferentes sabores de los quarks.

Aunque se presume que el quark b se desintegra lentamente de acuerdo con la escala temporal de los procesos de partículas elementales, la desintegración parece muy rápida en una escala macroscópica del tiempo. La vida media del b se cifra entre 10^{-13} y 10^{-14} segundos. En tan breve intervalo, un mesón B que viajara a la décima parte de velocidad de la luz recorrería sólo 0,0002 centímetros. Una distancia excesivamente corta para medirse con el detector CLEO. Lo máximo que podemos recabar de CLEO es que la vida media es inferior a los 10^{-10} segundos. Un estudio similar realizado en el anillo de almacenamiento electrón-positrón PETRA, del DESY, tiene la venta de un B de mayor energía (y, en consequencia, moviéndose más rápidamente). A pesar de una tasa de producción del B muy baja, este experimento dio un límite superior para la vida media del B situado en los 5×10^{-2} segundos.

¿Cuáles son los productos de desintegración del quark b? Tres clases posibles. Según el punto de vista clásico, el b emite un W^- y se transforma en un c o un u. Una posibilidad alternativa sería que el b emitiera un Z^o, transformándose en un s o un d. Éste es un proceso que cambia la belleza e involucra un Z^o, estando prohibido en caso de que el b forme parte de un doblete con el t. Por último, cabría que el b se desintegrara de alguna manera nueva e inesperada, sin involucrar la emisión de W^- ni de Z^o. Examinemos estas distintas posibilidades.

Según el que hemos llamado punto de vista clásico, en que el b se desintegra en un W^- y un u o un c, los productos finales de la desintegración del b deben incluir las partículas en las cuales el propio W^- se desintegra. Las opciones son $e^-\bar{\nu}_e$, $\mu^-\bar{\nu}_\mu$, $\tau^-\bar{\nu}_\tau$, $\bar{u}d$ y $\bar{c}s$. En general las opciones quark son tres veces más probables que las leptónicas. Contando los posibles resultados e introduciendo ciertos ajustes teóricos necesarios se predice que los productos finales de desintegración del b incluirán el electrón un 13 por ciento de las veces y el muon con el mismo porcentaje. Esta predicción concuerda bastante bien con las medidas experimentales de CLEO y CUSB, dando fuerza al punto de vista clásico sobre la desintegración de b.

Esta descripción teórica no formula ninguna predicción relativa a la cuestión de si el quark b se desintegra más frecuentemente en c o lo hace en u. Parece razonable que sea ésta una de las principales cosas que podemos esperar conocer del quark b. La reciente observación directa de mesones D^o en la desintegración del mesón B demuestra que, de hecho, el quark b se desintegra en c al menos una parte de las veces. A través de dos procedimientos se han medido las preferencias del quark b en su desintegración. La dominancia bien asentada de la desintegración de c en s sugiere el camino más obvio: cabe esperar que la desintegración de B produzca más partículas extrañas (kaones)

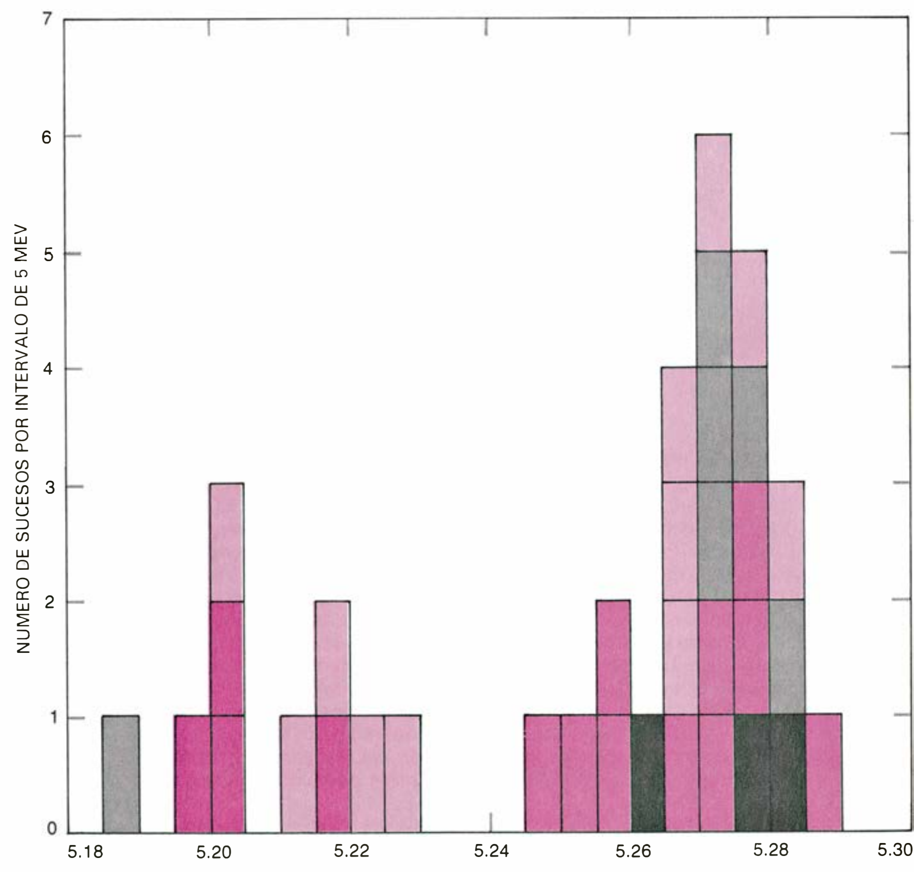
si el quark b se desintegra predominantemente en c que si lo hace en u. CLEO puede detectar tanto kaones cargados como neutros. Un estudio cuidadoso de la producción de kaones muestra la existencia de un claro aumento del índice de producción de kaones en los sucesos Y''', comparados con sucesos sin resonancia, que se traduce en una tasa combinada para la producción de kaones neutros y cargados de cerca de 1,4 partículas por cada desintegración de B. Teóricamente se esperarían cerca de 0,8 kaones por cada desintegración de B, si b se desintegrara siempre en u, y 1,6 si lo hiciera siempre en c. Las mediciones abogan por una desintegración dominante de b en c.

Hay una manera mejor de examinar el asunto: analizar la distribución del momento de los leptones en las desintegraciones semileptónicas de B. Entre los productos de una cualquiera de estas desintegraciones debe haber un leptón, un neutrino y uno o más hadrones. Si b se desintegra en c, se creará una partícula encantada. La partícula encantada más ligera es el mesón D, con una masa de 1,87 GeV. Por tratarse de una masa bastante grande, queda limitada la cantidad de energía que pueden llevarse los leptones como momento. Pero si b se desintegra en u, no es necesaria la creación de un hadrón tan masivo, y el leptón puede tener un momento mayor. Examinando la producción de leptones de momento elevado y comparando estas observaciones con lo que se esperaría en el caso de que b se desintegrara en c (o si lo hiciera en u) ha sido posible, otra vez, demostrar que b se desintegra principalmente en c. De estos datos se sigue que b no se desintegra en u más del cinco por ciento de las veces.

El punto de vista clásico sobre la desintegración del quark b, marco del análisis anterior, exige que el quark b comparta un doblete con el t. El descubrimiento de t resulta decisivo para confirmar este modelo. Se ha buscado el quark en experimentos desarrollados en los anillos de almacenamiento electrón-positrón PEP (en el SLAC) y PETRA (en el DESY). El fracaso en la búsqueda de t puede significar simplemente que la máxima energía de estas investigaciones (37 GeV) es demasiado pequeña para permitir la producción de estados ligados $t\bar{t}$. La vía alternativa sería rechazar la teoría clásica, por incorrecta, e idear entonces otra descripción teórica.

Si la teoría clásica es falsa, y el quark b carece de compañero, pensemos en la posibilidad de que se desintegre emitiendo un Z^0. (Recordemos que este proceso no está permitido en la teoría clásica.) Con independencia de que el b dé un d o un s, los productos de desintegración del Z^0 deben estar presentes entre los productos finales de la desintegración de b. El Z^0 puede producir e^+e^-, $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$, $\nu\bar{\nu}$, $u\bar{u}$, $d\bar{d}$, $s\bar{s}$ o $c\bar{c}$. Aquí las opciones e^+e^- y $\mu^+\mu^-$ son muy sugestivas, ya que dejarán señales inequívocas. La búsqueda de indicios de los dos caminos de desintegración de b, $b \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ + hadrones y $b \rightarrow e^+ + e^-$ + hadrones, no ha aportado prueba alguna de tales desintegraciones, llevando a la conclusión de que Z^0 no es el principal agente de la desintegración de b.

Resta la posibilidad de que b no se desintegre ni emitiendo un W^- ni emitiendo un Z^0, sino por una vía enteramente nueva. Dentro de los límites impuestos por consideraciones teóricas bastante generales sólo caben dos tipos adicionales de desintegración. El primero es la desintegración de b en un quark y dos leptones de dobletes diferentes. El segundo es la desintegración de b en un leptón y dos antiquarks. Si el quark b se desintegra según el primero de estos exóticos procesos, con dos leptones en la desintegración, cabría esperar sucesos con muchos muones, electrones, taus y neutrinos en diversas combinaciones. A su vez, los taus se desintegrarían, dejando parte de su energía a los neutrinos, que no se podrían detectar. Si este tipo de desintegración fuera significativo, se esperaría la observación frecuente de producción



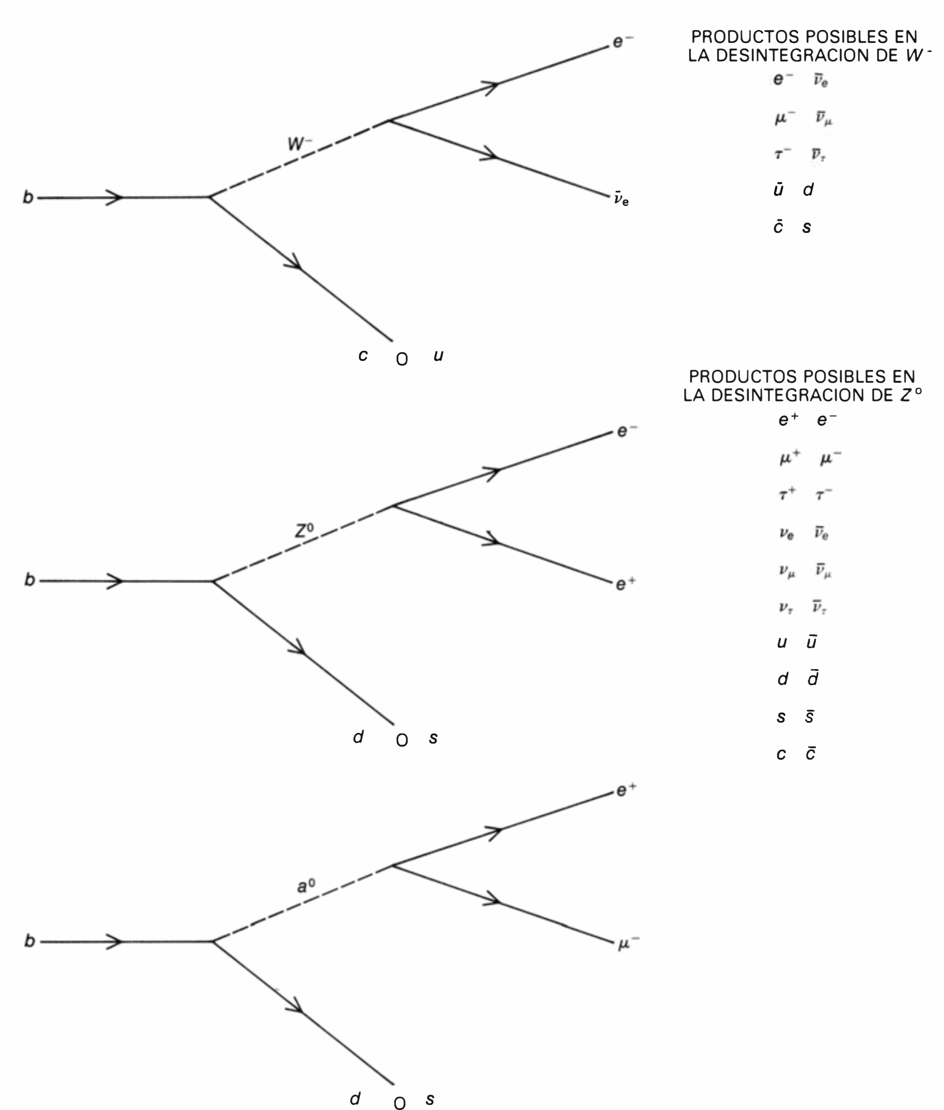
$B^\pm \rightarrow D^0 + \pi^\pm$

$B^0 \rightarrow D^0 + \pi^+ + \pi^-$

$B^0 \rightarrow D^\pm + \pi^\mp$

$B^\pm \rightarrow D^\pm + \pi^\mp + \pi^\mp$

8. RECONSTRUCCION DE LOS MESONES CON BELLEZA realizada por el grupo de CLEO examinando las trazas de partículas cargadas en la desintegración de la resonancia Y''' y tabulándolas en varias combinaciones de acuerdo con cuatro modelos diferentes sobre la posterior desintegración de los mesones con belleza (*señalados a la izquierda*). El diagrama de barras resultante muestra un pico en la vecindad de los 5274 millones de electronvolt. Los modos de desintegración específicos aquí considerados son inusuales, en el sentido de que el mesón B se desintegra en un pequeño número de partículas cargadas y ninguna neutra (salvo el D^0, mesón neutro encantado, que tiene una vida media corta). La escasez de tales desintegraciones y la dificultad en separarlas de los demás procesos de desintegración de Y''' quedan reflejadas en el exiguo número de datos recogidos tras nueve meses continuos de recopilación, contabilizando un total de 150.000 sucesos de colisión. La abreviación MeV de la ordenada o escala vertical significa "millones de electronvolt".



9. POSIBILIDADES de desintegración del quark *b* investigadas por el grupo de CLEO. En el modelo teórico clásico, que se funda en la presunta existencia de tres dobletes de quarks, el quark *b* se desintegra en un quark *c* o en un quark *u*, emitiendo un bosón W^- (*diagrama superior*). El W^- se desintegraría en cinco estados finales posibles, dos de los cuales $(e^-\bar{\nu}_e, \mu^-\bar{\nu}_\mu)$ son los modos semileptónicos que se observaron en el descubrimiento de la belleza desnuda. Si el quark *t*, el hipotético compañero del quark *b*, no existe, habrá un segundo mecanismo de desintegración de *b*, en cuya virtud éste se desintegraría en un quark *d* o un quark *s* emitiendo un Z^0 (*diagrama central*). De nuevo tendríamos una serie de posibles estados finales, dos de los cuales (e^+e^- y $\mu^+\mu^-$) ocurrirían, como se ha visto en el grupo de CLEO, muy raramente, si es que realmente se dan. Algunos teóricos dedicados a la búsqueda de alternativas al modelo clásico proponen procesos exóticos de desintegración que no involucran los habituales bosones de aforo. Un ejemplo es la desintegración del quark *b* en uno *d* o uno *s* con la emisión de a^0, bosón exótico neutro (*diagrama inferior*). El a^0 (del que no hay prueba experimental alguna) no necesita seguir las reglas que gobiernan los bosones de aforo convencionales; en consecuencia, puede desintegrarse en dos leptones de tipo diferente, por ejemplo, un muon negativo y un positrón (electrón positivo). Los experimentos realizados con CLEO han mostrado que tales procesos exóticos de desintegración tampoco son habituales.

de electrones y muones junto con una pérdida considerable de energía en los sucesos de desintegración de B. Con la medida simultánea de la producción de muones y electrones y de la energía detectable en cada suceso Y''', CLEO ha mostrado que este tipo de desintegración no es predominante.

En el segundo tipo de desintegraciones exóticas de b se crean 3 antiquarks más que quarks (uno ligado, en origen, al quark b y dos creados en la desintegración de éste). La presencia de tres antiquarks debe producir la creación de un antibarión en cada desintegración del mesón B. De manera similar, el exceso de quarks en la desintegración de $\bar{b}$ da lugar a un barión en cada desintegración de $\bar{B}$. Aunque hay muchos tipos de bariones (y antibariones) que pueden producirse, todos terminan por desintegrarse en protones y neutrones (o en antiprotones y antineutrones). En CLEO se pueden identificar los protones y antiprotones, pero los neutrones y antineutrones se escapan sin ser detectados. Si b se desintegra en un leptón y dos antiquarks, podría esperarse que los sucesos de desintegración de B dieran un muon, un electrón, un antiprotón o una gran cantidad de energía desaparecida. Con la medida simultánea de la producción de muones, electrones y antiprotones, junto con la energía detectada en cada suceso, los experimentadores de CLEO han mostrado que tampoco predomina este segundo tipo de desintegración exótica.

En resumen, todos los hechos sostienen la opinión de que el quark b se desintegra emitiendo un W^-. Además, hay indicios de que la mayoría de las veces lo hace dando un quark c en lugar de un quark u.

Aun cuando se está avanzando en la comprensión del quark b y sus interacciones, permanecen abiertas varias preguntas. ¿Cuál es la vida media del quark b? Hasta el presente sólo se han establecido límites superiores; sin embargo, están muy por encima de la vida media esperada y, por tanto, no ofrecen información nueva para evaluar la teoría. ¿Qué número de veces b se desintegra en u, y no en c? Los datos de CLEO y CUSB muestran que la fracción de desintegraciones de b en u es pequeña; pero, ¿cuánto? ¿Existe el quark t? Mostrando que los procesos que cambian la belleza e involucran a Z^0 ocurren poco frecuentemente (si lo hacen) y mostrando que los procesos inesperados, que no involucran ni a W^- ni a Z^0, son también escasos (o inexistentes), los experimentos de CLEO han excluido casi todas las teorías que pueden obviar la existencia del quark t. Quizás el quark t no se ha encontrado todavía por ser demasiado masivo, y su búsqueda con máquinas de colisión de haces de más alta energía fructificará. Si el quark t no existe, la teoría de la desintegración de quarks se hallaría en un serio aprieto.

Suponiendo incluso que el quark t acabe por hallarse restan todavía importantes cuestiones sobre los dobletes de quarks y leptones. Nadie niega que pueda construirse un mundo coherente con sólo un doblete leptónico (e^-, ν_e) y uno de quarks (u, d). Sin embargo, pensamos que existen por lo menos tres dobletes de cada tipo, y pueden descubrirse más aún. ¿Por qué la naturaleza se comporta de un modo tan derrochador? ¿En qué están relacionados los diversos dobletes y en qué difieren? ¿Qué significa realmente "sabor"? Las investigaciones que se acometan sobre el quark b traerán la respuesta a alguna de estas preguntas.

Lenguas criollas

Estas lenguas vastamente diseminadas muestran sorprendentes similitudes. El desarrollo del criollo en las islas Hawai sugiere que todos los niños aprenden un lenguaje construyendo primero una forma abstracta de criollo

Derek Bickerton

El viejo historiador griego Heródoto refiere que el faraón egipcio Psamético I, en el siglo VII a.J.C., se propuso averiguar cuál había sido la lengua originaria de la humanidad. Por orden regia se separó de sus padres a dos niños muy pequeños y se les confió a los cuidados de un pastor mudo que había recibido instrucciones para criarlos en total aislamiento de las demás personas. El pastor debería tomar nota de la primera palabra que los niños pronunciasen; "incontaminados" por el idioma de sus mayores –razonaba Psamético– empezarían a hablar en la lengua pura o primigenia, de la que se derivaban todas las otras. El primer vocablo inteligible que los niños pronunciaron fue "bekos", que significaba 'pan' en la antigua lengua frigia. Así que, sostenía Psamético, la lengua original de la humanidad es el frigio.

Esta leyenda ha divertido a generaciones de estudiantes de lingüística. La mayoría de los lingüistas, dando por descontado que tal experimento jamás debió de realizarse, desestiman el propósito de Psamético por lo defectuoso de su plan y lo improbable de que obtuviera ningún resultado útil. Verdaderamente, el suponer que pueda recuperarse un vocabulario "original" es superoptimista, y el aislamiento lingüístico del individuo, que ha sido documentado en unos cuantos casos de grave abuso contra la infancia, suele dar por resultado la ausencia de lenguaje. Sin embargo, una forma modificada del experimento se ha repetido muchas veces a lo largo de los últimos 500 años entre los hijos de esclavos y de trabajadores reducidos a servidumbre por las potencias coloniales europeas.

Estos obreros, llevados en barco de muchas partes del mundo para trabajar en plantaciones y tareas de recolección en Africa, en países costeros del Océano Indico, en el Oriente, en la zona del Caribe y en las islas Hawai, se vieron obligados a comunicarse, dentro de su políglota comunidad, por medio del rudimentario sistema de habla denominado 'pidgin' [inglés macarrónico]. El 'pidgin', extremadamente pobre de sintaxis y de vocabulario, constituía la única lengua común en que podían entenderse los niños nacidos en la comunidad colonial. A partir de tan modestos orígenes fueron evolucionando entre la gente menuda nuevos lenguajes nativos que reciben el nombre genérico de lenguas criollas. Y puede demostrarse que ofrecen la complejidad y la fuerza expresiva y de matización que universalmente se hallan en las lenguas más reputadas del mundo.

A primera vista, el desarrollo de muchas lenguas criollas diferentes parece sugerir que es perder el tiempo ponerse a buscar una única lengua originaria. No obstante, durante muchos años los estudiosos han venido advirtiendo que hay una notable similaridad estructural entre todas las lenguas criollas. Actualmente puede probarse, considerando el origen de la lengua criolla de Hawai, que las similitudes entre las lenguas criollas no se explican por el contacto con otras lenguas, sean indígenas o importadas. Este descubrimiento sugiere que lo que a las lenguas criollas les es común pudiera muy bien constituir la base de la adquisición del lenguaje por los niños de cualquier parte del mundo. Hoy día contamos con un impresionante cúmulo de pruebas en favor de esta hipótesis: entre las edades de los dos y los cuatro años los niños nacidos en el seno de una comunidad de adultos lingüísticamente competentes hablan una variedad de lenguaje cuya estructura tiene un gran parecido a la estructura de las lenguas criollas. De ahí que, por un irónico albur de la justicia, los restos lingüísticos supervivientes del colonialismo ofrezcan las claves indispensables para el estudio de nuestra propia herencia lingüística.

Se conocen bien las condiciones históricas que favorecieron el desarrollo de las lenguas criollas: entre los años 1500 y 1900 Inglaterra, Francia, Holanda, Portugal y España establecieron por doquier, a base de trabajo intensivo, numerosas economías agrícolas en litorales desiertos y en islas tropicales de escasa población. Las colonias se dedicaron sobre todo al monocultivo, ordinariamente del azúcar, y su viabilidad económica dependía de la abundancia de mano de obra barata importada de lejanos países en condiciones de ominosa esclavitud. Los trabajadores eran traídos, al principio, del Africa Occidental y, después, del Africa Oriental, de la India y del Oriente, y hablaban muchas lenguas mutuamente incomprensibles.

Si las condiciones de la inmigración hubiesen sido más propicias, aquellos trabajadores o sus hijos habrían llegado a aprender la lengua de la potencia colonizadora local, pero se combinaron dos factores para impedir que así fuese. Primero, que el número de hablantes de las lenguas colonizadoras rara vez pasaba del 20 por ciento de la población total, y a menudo era inferior al 10 por ciento. En otras palabras, era relativamente escaso el personal del que el idioma dominante pudiera haber sido aprendido. Segundo factor, que las sociedades coloniales eran pequeñas, autocráticas y rígidamente estratificadas. Había allí pocas oportunidades para un contacto lingüístico prolongado entre los trabajadores de los campos y quienes hablaban la lengua de la dominación.

Excepto en Hawai, son escasas las pruebas documentales fiables concernientes a la historia lingüística de los comienzos de las sociedades coloniales. Generalmente se ha supuesto que el 'pidgin' se desarrolló como una lengua de contacto tan sólo para posibilitar la comunicación entre los amos y los trabajadores y entre los trabajadores procedentes de distintos grupos de inmi-

grantes. Después, entre los hijos de aquellos trabajadores y mediante la "expansión" del 'pidgin', se originaron las lenguas criollas; los niños tenían pocas ocasiones de usar las lenguas ancestrales de sus padres y estaban aún faltos de acceso a la lengua de la cultura dominante. Lo que se quiere decir con el término "expansión" no quedaba nada claro hasta que mis colegas y yo empezamos nuestros estudios en Hawai.

La única ventaja para el estudio de la lengua criolla de Hawai es que los detalles de su formación pueden reconstruirse, en parte al menos, a partir del habla de gentes que aún viven. Aunque el contacto de los hawaianos con los europeos se remonta hasta 1778, no fue hasta 1876 cuando una revisión de las leyes arancelarias estadounidenses, que permitió la libre importación del azúcar hawaiano, capacitó a los ingenios azucareros de Hawai para aumentar sus exportaciones en varios centenares por ciento. Empezó a reunirse una multitud políglota de obreros contratados formada por chinos, filipinos, japoneses, coreanos, portugueses, portorriqueños y gentes de otras procedencias, y hacia 1900 esta multitud superaba a los demás grupos de Hawai, tanto nativos como europeos, en la proporción de dos a uno.

Un 'pidgin' basado en el idioma polinesio hawaiano sirvió inicialmente de medio de comunicación entre los inmigrantes y los nacidos en las islas, pero la anexión de Hawai por los EE.UU. en 1898 llevaría con el tiempo a la sustitución del hawaiano por el inglés. Desde 1900 el idioma hawaiano fue decayendo, y el 'pidgin' de Hawai fue remplazado como lengua franca por un 'pidgin' basado en el inglés. Por la época en que comenzamos nuestro estudio intensivo de la variación del lenguaje en Hawai, a principios de los años 1970, había allí todavía muchos supervivientes, tanto inmigrantes como nacidos en las islas, de los años 1900 a 1920.

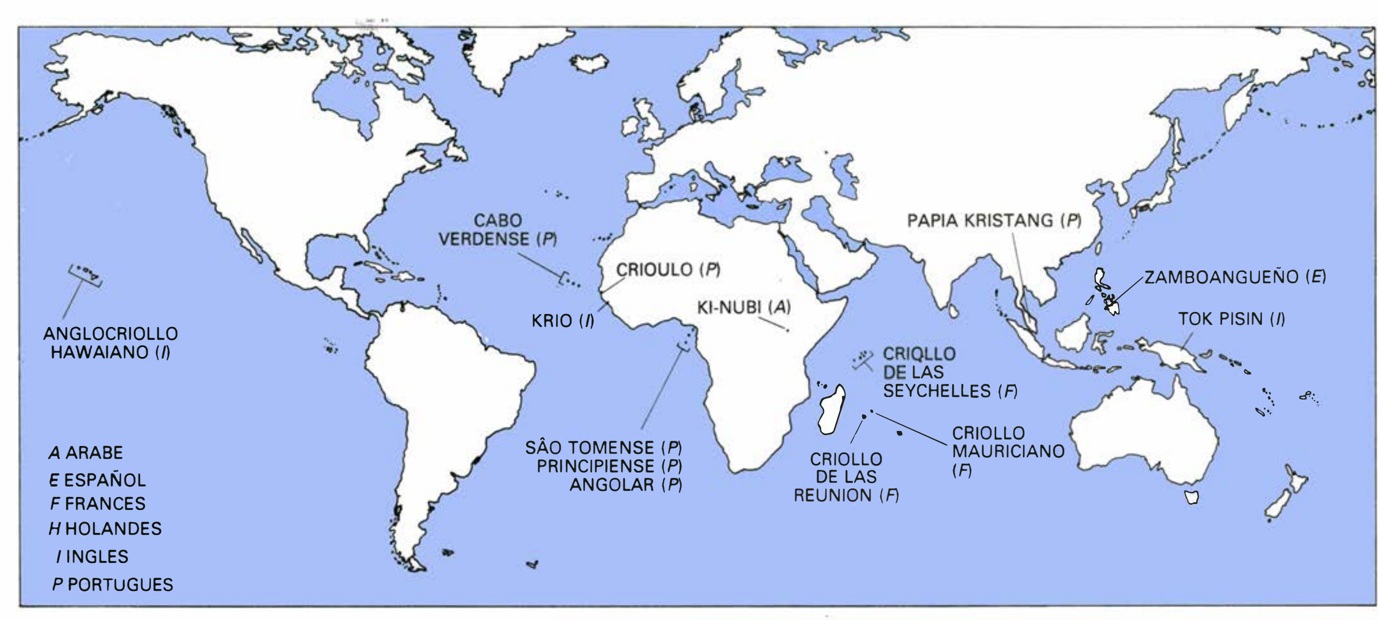
Nuestros registros de las personas allí nacidas pusieron en claro que el proceso de criollización estaba en curso hacia 1900 y sin duda se había completado ya hacia 1920. La mayoría de los rasgos lingüísticos que caracteri-



1. OBREROS CONTRATADOS de una plantación de caña de azúcar, que hablaban un lenguaje rudimentario llamado 'pidgin'. Fotografía hecha en Hawai por Ray Jerome Baker en 1924. Miles de trabajadores fueron llevados de muchos países a Hawai, a finales del s. XIX y comienzos del s. XX, para cubrir la demanda de fuerza laboral en las plantaciones de caña azucarera y de piña. El 'pidgin' se formó por la necesidd de comunicación entre los diversos grupos lingüísticos que había en aquella masa políglota de trabajadores; los obreros de la foto, por ejemplo, aunque procedentes en su mayoría de las Filipinas, hablaban al principio de su reunión distintos idiomas mutuamente incomprensibles, tales como el visayan, el ilocano y el tagalo. Los hijos de los 'pidgin'-parlantes permanecieron mucho tiempo separados de quienes hablaban hawaiano o inglés y no heredaron de la generación anterior ningún modelo lingüístico consistente que pudiera satisfacer sus necesidades. Entre aquellos niños se formó un lenguaje, mucho más sofisticado que el 'pidgin', llamado criollo anglohawaiano, cuyo vocabulario es sobre todo inglés pero cuya estructura o gramática es muy diferente de la del inglés y de la de cualquier otra lengua no criolla. Circunstancias socioeconómicas similares a las de Hawai dieron origen a lenguajes 'pidgin' en todo el mundo; estos lenguajes fueron convertidos en lenguas criollas por los hijos de los inmigrantes. (Colección de Ray Jerome Baker y Robert E. Van Dyke, en Honolulú, Hawai.)

zan el inglés criollo hawaiano están presentes en el habla de las gentes de la clase obrera nacidas en Hawai a partir de 1905; con anterioridad a esta fecha, la proporción entre quienes hablan criollo y el resto de la población disminuye rápidamente. Por otro lado, el habla de los inmigrantes es siempre alguna forma de 'pidgin', aunque cuál sea esa forma depende de la fecha en que llegó a Hawai el inmigrante y también del idioma básico suyo. El 'pidgin' hablado por los inmigrantes más antiguos de entre nuestros sujetos es mucho más rudimentario que el hablado por los más recientes, probablemente porque estos últimos fueron ya influidos por el criollo tanto como por el 'pidgin'. Sin embargo, la distinción entre 'pidgin' y criollo sigue siendo fundamental: quienquiera que esté familiarizado con Hawai podrá identificar en seguida los orígenes étnicos de cualquier inmigrante basándose tan sólo en su forma de hablar. En cambio, si no se guía por algún tópico conversacional o por el aspecto físico de la persona, nadie logrará identificar con garantías de acierto los orígenes étnicos de cualquier hablante nacido en las islas basándose tan sólo en su pronunciación o en la estructura gramatical de sus frases.

Una de las principales características del 'pidgin' es, pues, su variabilidad de un hablante a otro. Diríase que cada inmigrante se hubiese dedicado a inven-





2. DISTRIBUCION MUNDIAL de las lenguas criollas. Refleja las circunstancias históricas de su desarrollo. Casi todas las lenguas criollas se formaron en apartadas costas o islas tropicales, donde las potencias colonizadoras habían establecido economías agrícolas, principalmente monocultivos de azúcar u otros, a base de mano de obra inmigrante barata. La dispersión geográfica de las colonias sugiere que las lenguas criollas se desarrollaron independientemente unas de otras. Las letras entre paréntesis tras el nombre de cada lengua indican el idioma colonial del que fue tomada la mayor parte del vocabulario.

tar un lenguaje con el que salir del paso de un modo individual. Por ejemplo, los hablantes de 'pidgin' que son de ascendencia japonesa generalmente ponen el verbo al final de la frase, como ocurre en ésta: "The poor people all potato eat" ("All that the poor people ate were potatoes") ["La gente pobre todo patata come" por "Todo lo que los pobres comían eran patatas"]. En cambio, el 'pidgin' filipino pone el verbo antes del sujeto: "Work hard these people" ["Trabaja duro esta gente"] por "These people work hard" ["Esta gente trabaja duro"]. Las más de las veces el orden de las palabras no sigue ningún principio fijo, excepto el pragmático de que la información vieja, compartida, se ha de dar próxima al comienzo de la frase y la información nueva próxima al final.

Es probable que todo lo que pueda expresarse en criollo, o para el caso en inglés, pueda también ser expresado en 'pidgin'. Sin embargo, quien habla el 'pidgin' está en gran desventaja, porque el 'pidgin' carece de muchos de los bloques de construcción que poseen todas las lenguas nativas. Necesidades tan corrientes del lenguaje como son los artículos, las preposiciones y los verbos auxiliares o brillan por su ausencia o aparecen esporádicamente y de manera totalmente impredecible. Las frases 'pidgin' no tienen cláusulas subordinadas y a las enunciaciones monoclausulares frecuentemente les faltan los verbos.

'PIDGIN'	ANGLOCRIOLLO HAWAIANO
Building—high place—wall part—time—now-time—and then—now temperature every time give you.	Get one [There is an] electric sign high up on da wall of da building show you what time an' temperature get [it is] right now.
Now days, ah, house, ah, inside, washi clothes machine get, no? Before time, ah, no more, see? And then pipe no more, water pipe no more.	Those days bin get [there were] no more washing machine, no more pipe water like get [there is] inside house nowadays, ah?
No, the men, ah—pau [finished] work—they go, make garden. Plant this, ah, cabbage, like that. Plant potato, like that. And then—all that one—all right, sit down. Make lilly bit story.	When work pau [is finished] da guys they stay go make [are going to make] garden for plant potato an' cabbage an' after little while they go sit down talk story ["shoot the breeze"].
Good, this one. Kaukau [food] any kind this one. Pilipin island no good. No more money.	Hawaii more better than Philippines, over here get [there is] plenty kaukau [food], over there no can, bra [brother], you no more money for buy kaukau [food], 'a'swhy [that's why].

3. LAS VERSIONES 'PIDGIN' Y CRIOLLA de idénticas frases ilustran las diferencias estructurales entre el 'pidgin' y el criollo de Hawai. El 'pidgin', hablado sólo por los inmigrantes, varía mucho de un hablante a otro. Aunque es probable que en 'pidgin' pueda decirse todo lo que en inglés o en criollo, la estructura del 'pidgin' es muy rudimentaria. Las frases 'pidgin' son poco más que series de nombres, verbos y adjetivos, dispuestas en muchos casos de modo que la información vieja, ya sabida, vaya antes y la nueva vaya después en la frase. El criollo surgió en Hawai sólo entre los hijos de los inmigrantes, y es mucho más rico en estructura gramatical que el 'pidgin'. Además, las reglas de la gramática criolla son uniformes para todos los hablantes y se parecen a las reglas estructurales de todas las lenguas criollas.

El primero de los ejemplos siguientes fue tomado de un 'pidgin' –hablante coreano; las palabras omitidas las incluiremos entre corchetes en la traslación: "And a too much children, small children, house money pay" ("And [I had] too many children, small children, [I had] to pay the rent"). ["Y un demasiado hijos, pequeños hijos, casa renta pagar". ("Y [yo tenía] demasiados hijos, hijos pequeños, [yo tenía que] pagar el alquiler").] El segundo ejemplo fue tomado de un hablante japonés: "Before mill no more Filipino no nothing" ("Before the mill [was built, there were] no Filipinos here at all"). ["Antes molino no más filipino no nada" ("Antes de que el molino [fuese construido], ningún filipino había aquí en absoluto").] El tercer ejemplo, tomado de la jerga de un conductor de autobús retirado, ilustra los enormes esfuerzos que se necesitan para decir en 'pidgin' cualquier cosa que se salga de lo ordinario: "Sometime good road get, sometime, all same bend get, enguru [angle] get, no? Any kind same. All same human life, all same" ("Sometimes there's a good road, sometimes there's, like, bends, corners, right? Everything's like that. Human life's just like that"). ["A veces hay una buena carretera, a veces hay, igual, curvas, eses, ¿no? Todo es como esto. La vida humana es exactamente como esto"].

La tarea de aprender el lenguaje a la que se ha de enfrentar el niño nacido en una comunidad de tales hablantes es muy diferente de la que se le impone al niño que está rodeado de adultos lingüísticamente competentes. Los hijos de padres ingleses o chinos, por ejemplo, tienen presentes para seguirlos unos modelos muy precisos. Aunque sus errores raras veces son corregidos abiertamente, les es posible contrastar casi de continuo sus propias expresiones con las de los hablantes mayores y adaptarlas a éstas en lo necesario. Cuando han aprendido las estructuras más sencillas de su lengua, las más complejas les son fácilmente asequibles.

Para el niño nacido en Hawai de padres inmigrantes no había, sin embargo, ningún modelo lingüístico consistente que le guiase en la ordenación básica de las palabras de las frases sencillas y, a menudo, ningún modelo en absoluto para las estructuras de la lengua más complicadas. Muchos de tales niños eran fruto de matrimonios interétnicos o interraciales, de modo que incluso en el hogar tenían pocas ocasiones de hablar la lengua nativa de uno u otro de los progenitores. Más todavía, hasta entre los niños no nacidos de matrimonios lingüísticamente mixtos había un considerable incentivo para abandonar la lengua nativa de los padres y adoptar alguna versión del 'pidgin' en la compañía de los demás chiquillos y de los vecinos adultos. Como la primera generación de hijos de inmigrantes en cualquier otra parte del mundo, los hijos de los inmigrantes hawaianos se hicieron con frecuencia bilingües y hasta trilingües, y adoptaron la lengua común de sus iguales como una lengua nativa pese a los notables esfuerzos de sus padres por conservar el idioma de sus antepasados.

Las pruebas históricas confirman la opinión de que la estructura de la lengua criolla se formó sin ningún préstamo importante de otras lenguas. Los niños bilingües o trilingües de edad escolar no necesitan (ni suelen) entremezclar los rasgos estructurales de las lenguas que hablan, y no hay razón para suponer que tales entrecruzamientos fuesen comunes en Hawai. Pero el argumento más convincente en pro de la emergencia autónoma de la lengua criolla és el de su observada uniformidad. ¿Cómo una lengua tan consistente y uniforme pudo desarrollarse, en una sola generación, a partir del increíble batiburrillo lingüístico que era el 'pidgin' hawaiano? Aun en el supuesto de que los niños de los diversos grupos inmigrantes hubiesen comenzado por aprender las lenguas de sus padres, y aun cuando las diferencias entre los varios 'pidgins' se hubiesen suavizado por la interacción y el contacto entre los ni-

ños, la homogeneidad de la lengua que se desarrolló sigue necesitando una explicación. Cincuenta años de contactos entre los 'pidgin'-hablantes adultos no fueron suficientes para borrar las diferencias entre los grupos de lenguas nacionales; la homogeneidad tiene que haber sido el resultado de las diferencias entre los niños y los adultos.

Cabría suponer aún que la uniformidad estructural de la lengua criolla se derivase de ciertas estructuras de una de las lenguas ancestrales o quizá de ciertas estructuras del inglés, idioma de los dueños de las plantaciones. Pero son muchas las diferencias existentes entre la estructura de la lengua criolla y la de cualquiera de las lenguas con que los hablantes de la criolla pudieran haber estado en contacto. Por ejemplo, en inglés es posible referirse a un objeto o a un grupo de objetos de un modo indeterminado, pero la gramática inglesa le obliga al hablante a decir con anticipación si el número de objetos sin determinar es uno o muchos, singular o plural. Se ha de decir "I am going to the store to buy shirts" o "I am going to the store to buy a shirt", aunque uno no quiera comprometerse de antemano a comprar un número determinado de camisas.

En criollo se puede aplicar al sustantivo "shirt" un distintivo numérico gramaticalmente neutro para no concretar la cantidad: "I stay go da store for buy shirt" ("I am going to the store to buy shirt"). Más aún, en criollo la adición de un artículo definido o indefinido a "shirt" cambia el significado de la frase. Diciendo "I stay go da store for buy one shirt" el criolloparlante hace saber que la camisa es una concreta; en la frase "I stay go da store for buy da shirt" el hablante presupone además que el oyente conoce ya la camisa que aquel va a comprar.

Hay otros muchos rasgos por los que el criollo hawaiano se diferencia del inglés. Mientras que en inglés hay un tiempo pasado, que suele señalarse con el sufijo "-ed", en criollo hay un tiempo denominado tiempo anterior que se distingue con "bin" cuando se trata de hablantes mayores y con "wen" si los hablantes son jóvenes. El tiempo anterior es algo así como el pasado perfecto inglés: el inglés "had walked" es en criollo "bin walk", y el inglés "walked" es en criollo simplemente "walk". Para distinguir acciones o procesos irreales o posibles de los reales, emplea el inglés el condicional o futuro. En criollo todas esas circunstancias irreales son expresadas mediante la partícula "go", que se pone delante del verbo principal e indica lo que los lingüistas llaman la modalidad. Por ejemplo, la frase inglesa "If I had a car, I would drive home" equivale a la criolla, "If I bin get car, I go drive home".

Hay también un verbo auxiliar criollo que indica lo que los lingüistas llaman aspecto; se pone asimismo ante el verbo principal y hace saber que la acción expresada por el verbo no es puntual, o sea, que es repetida, habitual, continuante o incompleta. Para decir "I run in Kapiolani Park every evening" en criollo se ha de decir "I stay run in Kapiolani Park every evening". Si el criollo-parlante omite la partícula "stay", da a entender que la acción queda realizada del todo o no es repetitiva.

En inglés no hay manera de distinguir directamente los propósitos que han tenido cumplimiento de los que no lo han tenido. La frase "John went to Honolulu to see Mary" no especifica si, de hecho, John vio a Mary o no la vio. Según la gramática criolla, debe resolverse tal ambigüedad. Si John vio a Mary y el criolloparlante sabe que, en efecto, John la vio, habrá de decir: "John bin go Honolulu go see Mary". Si John no vio a Mary o si el hablante ignora si la vio o no, deberá decir: "John bin go Honolulu for see Mary".

Distinciones parecidas podrían notarse entre la estructura gramatical del criollo y la estructura de otros lenguajes de contacto, tales como el hawaiano, el ilocano (que se habla al norte de la isla filipina de Luzón) y el japonés. Hay también semejanzas, pero la mayoría de ellas se limitan a las expresiones idiomáticas. Por ejemplo, la expresión anglocriolla "O the pretty", que quiere decir "How pretty he [she/it] is", es traslación literal del idiotismo del lenguaje hawaiano "O ka nani". Por lo general, empero, nuestras investigaciones dan mucho pie para pensar que las estructuras básicas del criollo difieren de las de los otros lenguajes. Aunque pudiera parecer que algunos hijos de inmigrantes habrían transferido las estructuras de las lenguas nativas de sus padres al idioma criollo en evolución, de hecho no fue así. Los elementos lingüísticos estructurales de que disponían los hijos no fueron, por lo que parece, utilizados en el desarrollo del criollo.

Aun en el caso de que pudiera demostrarse que todas las estructuras gramaticales del criollo fueron tomadas, al estilo de los autoservicios, de una u otra lengua de contacto, la uniformidad del criollo plantearía esta difícil cuestión: ¿cómo se las arreglaron los parlantes que inventaron el criollo para ponerse de acuerdo acerca de qué estructura tomar en préstamo y de qué lengua? Sin tal acuerdo el criollo no sería tan uniforme como lo es. Pero parece improbabilísimo que se pudiese llegar al acuerdo tan rápidamente. De haber habido un muy importante tomar

INGLES	ANGLOCRIOLLO HAWAIANO
The two of us had a hard time raising dogs.	Us two bin get hard time raising dog.
John and his friends are stealing the food.	John-them stay cockroach the kaukau.
He doesn't want to play because he's lazy.	He lazy, 'a'swhy he no like play.
How do you expect to finish your house?	How you expect for make pau you house?
It would have been better if I'd gone to Honolulu to buy it.	More better I bin go Honolulu for buy om.
The one who falls first is the loser.	Who go down first is loser.
The man who was going to lay the vinyl had quoted me a price.	The guy gon' lay the vinyl bin quote me price.
There was a woman who had three daughters.	Bin get one wahine she get three daughter.
She can't go because she hasn't any money.	She no can go, she no more money, 'a'swhy.

4. DIFERENCIAS ESTRUCTURALES ENTRE FRASES en criollo hawaiano y sus equivalentes inglesas. Nos muestran que la gramática del criollo no se originó como una gramática tomada en préstamo del inglés. Por ejemplo, el tiempo pasado perfecto de un verbo se expresa en criollo por medio de las partículas "bin" o "wen" precediendo al verbo principal, en vez de por el sufijo "-ed". El aspecto no puntual o progresivo se expresa mediante la palabra "stay", en vez de por el sufijo "-ing". En la frase inglesa "The two of us had a hard time raising dogs" ["Nosotros dos pasamos una mala época criando perros"] las reglas de la gramática obligan al hablante a indicar que el sustantivo "dog" es o singular o plural. En la versión criolla de la frase no va implicado ni el singular ni el plural. Hay también diferencias léxicas relativamente insignificantes entre los dos lenguajes: "cockroach" es típicamente empleado como un verbo, y "kaukau", que quizá se derive del término chino-'pidgin' "chowchow", es un vocablo común que se usa por "food" (alimento). No menos notables diferencias estructurales se constatan entre el criollo hawaiano y otros idiomas inmigrados, como el chino, el hawaiano, el japonés, el coreano, el portugués, el español o el filipino, con los que los hablantes del criollo hawaiano podrían haber estado en contacto.

en préstamo de las lenguas ancestrales, las diferencias entre las versiones del criollo hablado por los distintos grupos habrían persistido al menos una generación después de la primera generación de hablantes.

El problema de la uniformidad del criollo hawaiano presenta además otra dimensión. Resulta que las lenguas criollas de todas partes del mundo muestran la misma uniformidad e inclusive las mismas estructuras gramaticales que se observan en Hawai. Este hallazgo es tanto más digno de nota cuando se lo compara con la más bien escasa correspondencia de estructura que he observado entre el criollo hawaiano y otras lenguas de contacto de Hawai. Por ejemplo, la distinción que en el criollo hawaiano se hace entre el número singular, el número plural y el número neutro se hace también en todas las demás lenguas criollas. Asimismo, en todas las otras lenguas criollas hay tres partículas invariantes que hacen las veces de verbos auxiliares y desempeñan las mismas funciones que "bin", "go" y "stay" en el criollo hawaiano.

En el criollo de Haití, por ejemplo, la palabra "té" señala el tiempo anterior del verbo, la palabra "av(a)" la modalidad irreal, y la palabra "ap" el aspecto del verbo como no puntual. Así, en el criollo haitiano la frase "I have been walking" ["He estado paseando"] se convierte en "m[I] t'ap [té+ap] maché". De modo semejante, en sranan, criollo de base inglesa radicado en Surinam (antes Guayana holandesa), la señal del tiempo anterior es "ben", la de la modalidad irreal es "sa" y la del aspecto no puntual es "e". La frase "He would have been walking" ["El habría estado paseando"] se convierte en "A [=he] ben sa e waka". Lo más notable de todo es que hay un orden estricto que en todas las lenguas criollas debe seguirse cuando en una frase están presentes más de una de esas señales: la partícula para el tiempo precede a la partícula para la modalidad, y ésta precede a la del aspecto.

Por último, considérese la distinción gramatical, a que antes hice referencia, entre los propósitos cumplidos y los incumplidos. La misma distinción, ausente del inglés, se encuentra en todos los idiomas criollos. En el criollo mauriciano [de la isla Mauricio], basado en el vocabulario francés que allí se usa, una frase como "Decidió comer carne" puede expresarse de dos maneras: si el sujeto de la frase llevó a cabo su propósito, se dirá "Li ti desid al mâz lavian", que significa literalmente "Decidió efectuar el comer carne"; si la decisión no se puso por obra, se dirá "Li ti desid pu mâz lavian", literalmente "Decidió que comería carne". En el criollo de Jamaica la frase "Fue a fregar" debe expresarse o bien como "Im gaan fi bied" ("Fue con la intención de fregar") o bien como "Im gaan go bied" ("Fue a fregar y lo llevó a cabo").

LENGUAJE INFANTIL INGLES	CRIOLLOS DE BASE INGLESA
Where I can put it?	Where I can put om? (Hawaii)
Daddy throw the nother rock.	Daddy t'row one neda rock'tone. (Jamaica)
I go full Angela bucket.	I go full Angela bucket. (Guyana)
Lookit a boy play ball.	Luku one boy a play ball. (Jamaica)
Nobody don't like me.	Nobody no like me. (Guyana)
I no like do that.	I no like do that. (Hawaii)
Johnny big more than me.	Johnny big more than me. (Jamaica)
Let Daddy get pen write it.	Make Daddy get pen write am. (Guyana)
I more better than Johnny.	I more better than Johnny. (Hawaii)

5. HAY FRASES PRONUNCIADAS POR NIÑOS DE DOS A CUATRO AÑOS, hijos todos ellos de padres angloparlantes (*columna de la izquierda*), sorprendentemente parecidas a frases de lenguas criollas basadas en la inglesa (*columna de la derecha*). Las similaridades entre las lenguas criollas y lo verosímil de que esas lenguas se originaran independientemente unas de otras sugieren que el criollismo lingüístico se desarrolla dondequiera que no hay una lengua nativa que sirva de modelo adecuado. El autor conjetura que si a unos niños se les separa de su nativa comunidad angloparlante a la edad de unos dos años, hablarían un lenguaje cuyo vocabulario sería primordialmente inglés pero cuya gramática sería criolla.

Estos ejemplos solamente sugieren la amplitud de las semejanzas estructurales que se dan entre las lenguas criollas. Semejanzas a las que no parece afectar la gran dispersión geográfica de estas lenguas ni lo muy diversas que son lenguas como la holandesa, la inglesa y la francesa, de las que las criollas a que nos estamos refiriendo toman la mayor parte de su vocabulario. Estudiosos como Hugo Schuchardt empezaron a advertir tal parecido en el siglo XIX, y por los años 1960 fueron explorados en detalle numerosos ejemplos por Douglas Taylor, por Robert Wallace Thompson, de la Universidad de las Indias Occidentales, y por Keith Whinnom, de la Universidad de Exeter. Así, aun antes de que el desarrollo del criollo hawaiano fuese razonablemente bien entendido, se reconocieron las similitudes gramaticales existentes entre las lenguas criollas del mundo entero como un hallazgo que requería explicación.

Ante tal descubrimiento, la primera reacción del lingüista es buscarles a las lenguas semejantes un antepasado común. Por ejemplo, se ha conjeturado que el antepasado lingüístico sería un lenguaje de contacto que se formó a partir del portugués y de ciertos lenguajes oesteafricanos durante las primeras exploraciones portuguesas del Africa en los siglos XV y XVI. Según tal hipótesis, esa lengua de contacto se habría ido difundiendo luego alrededor del mundo llevada por los marinos portugueses, y habría ido cambiando su vocabulario pero no su sintaxis ni su semántica a medida que entró en la esfera de influencia de otras potencias coloniales. A primera vista, esta explicación podría parecer adecuada respecto del desarrollo del criollo hawaiano, pues a finales del siglo XIX y comienzos del XX fueron traídos a las islas gran número de operarios portugueses.

La explicación adolece de varios defectos graves. En primer lugar, el criollo hawaiano se parece muy poco a cualquiera de los idiomas de contacto, incluido el portugués. En segundo lugar, las presuntas similitudes lingüísticas entre los criollos y el portugués o entre los criollos y los lenguajes oesteafricanos están evidentemente exageradas. Y, lo principal de todo, nuestro estudio de cientos de hablantes hawaianos ha puesto en claro que el criollo de Hawai se originó, casi con absoluta certeza, en las mismas islas Hawai. No hemos encontrado ningún inmigrante superviviente que hable algo que se aproxime a una lengua criolla; en cambio, todos los inmigrantes observados por nosotros hablan alguna variedad del 'pidgin'. Si el criollo hawaiano fuese primordialmente una lengua importada, habría sido traído por los inmigrantes y presumiblemente los demás lo habrían aprendido al convivir con la población inmigrante. Por lo tanto, se ha de concluir que el criollo hawaiano se originó entre los hijos de los inmigrantes, donde actualmente se le halla. Y si una lengua criolla pudo formarse en Hawai sin necesidad de antepasados, también pudo formarse en cualquier otra parte de un modo parecido.

Las implicaciones de estos descubrimientos son enormes. Siendo como son las estructuras gramaticales de las lenguas criollas más semejantes entre sí, unas a otras, que a las estructuras de cualquier otra lengua, es razonable suponer que la mayoría, si no la totalidad, de las lenguas criollas fueron inventadas por los hijos de inmigrantes 'pidgin'-parlantes. Más aún, puesto que las lenguas criollas hubieron de ser inventadas aisladamente, por separado unas de otras, es probable que las semejanzas lingüísticas que entre ellas se advierten se deban a alguna capacidad general de la humanidad.

La sugerencia de que el género humano está biológicamente predispuesto para el uso del lenguaje no es nueva: durante más de dos decenios Noam Chomsky, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, ha sostenido que hay una gramática universal innata subyacente a todos los idiomas humanos. La gramática universal es postulada basándose principalmente en que sólo mediante ella podrían los niños adquirir el dominio de un sistema tan enormemente complejo como un idioma humano en el breve tiempo en que lo hacen. Los estudios del recientemente fallecido Eric H. Lenneberg tienden a confirmar la hipótesis de Chomsky. La adquisición del lenguaje se parece a la adquisición de otros aspectos complejos y flexibles de la conducta infantil, tales como el andar, que son indudablemente controlados en algún grado por el desarrollo neurofisiológico. La gramática universal conjeturada por Chomsky es un dispositivo computador, realizado de una u otra forma neurológicamente, que pone a disposición del niño una amplia gama de modelos gramaticales. Según Chomsky, el niño debe entonces "seleccionar" aquel de los modelos gramaticales disponibles que hace juego con la gramática del lenguaje en cuyo medio ha nacido.

Los datos de las lenguas criollas sugieren que la adquisición del primer lenguaje se logra por mediación de un dispositivo innato bastante diferente. En vez de poner a disposición del niño un conjunto de modelos gramaticales, le proporciona más bien un modelo gramatical único y muy específico. Tan sólo en las comunidades 'pidgin'-parlantes, en las que no había ningún modelo gramatical que pudiese competir con la gramática innata del niño, no fue a la larga suprimido el modelo gramatical innato. La gramática innata se revistió luego con cualquier vocabulario que estuviera disponible en la localidad y se originaron así las lenguas criollas que oímos hoy.

Las implicaciones de esta hipótesis ponen en tela de juicio una idea que la mayoría de los lingüístas, incluyendo a Chomsky, han aceptado tácitamente durante muchos años, a saber, la de que ninguna de las lenguas del mundo le es al niño más fácil o más difícil de adquirir que cualquiera otra. Pues si hay una gramática criolla impresa en cierto modo en la mente humana, las lenguas criollas deberían ser más fáciles de adquirir que las otras lenguas. ¿Cómo es, por tanto, que no todos los niños empiezan por hablar una lengua criolla? La respuesta es que hacen cuanto pueden por hablarla, pero como la gente que los rodea persiste en hablar inglés o francés o algún otro idioma, los niños han de modificar la gramática de su criollo nativo hasta que se adapte a la de la lengua local.

Dos tipos de datos lingüísticos son relevantes para poner a prueba la hipótesis. Primero, si alguna estructura gramatical del criollo es diversa de la correspondiente estructura gramatical del idioma local, deberá darse el caso de que los niños cometan errores sistemáticos con respecto a la estructura de la lengua local. Por otro lado, si las dos estructuras gramaticales tienden a coincidir, se constatará que es extremadamente temprana, rápida y sin errores la adquisición de la estructura del idioma local.

Considérese el error sistemático observado por David McNeill, de la Universidad de Michigan, en el habla de un pequeño de cuatro años. En una de las sesiones de observación, el niño se quejó así: "Nobody don't like me" ["Nadie no hacer ello: quererme"]; la madre del niño le contestó corrigiéndole la frase: "Nobody likes me" ["Nadie me quiere"]. Entonces el pequeño repitió su frase y la madre repitió su corrección no menos de ocho veces. Por último, el niño cambió su frase y exclamó exasperado: "Nobody don't likes me" ["Nadie no hacer el me quiere"].

Este error se halla en muchos niños anglohablantes de entre los tres y medio y los cuatro años de edad, incluyendo a niños que no están expuestos a dialectos del inglés en los que se emplean negativas dobles. Hay muchas lenguas, tales como la francesa y la española, que emplean también las negativas dobles, pero los únicos lenguajes que admiten sujetos negativos con verbos negativos son los criollos. Por ejemplo, en papia kristang, el lenguaje criollo de base portuguesa que se habla en la península de Malaya, se puede decir: "Angkosa nte mersimentu", que significa "Nada no tiene merecimiento (o valor)". En el criollo guayanés, basado en el inglés y que se habla en Guyana (antes Guayana inglesa), se puede decir: "Non dag na bait non kyat", esto es, "Ningún perro no mordió a ningún gato".

Un segundo ejemplo de error sistemático se halla en la formación de las preguntas que hacen los niños. Estos, al aprender el inglés, suelen indicar las interrogaciones tan sólo mediante su entonación; casi nunca se invierten el sujeto y el verbo auxiliar. Por ejemplo, los niños dicen a menudo cosas como "You can fix this?" [¿Puedes arreglar esto?] aunque han oído innumerables preguntas tales como "Can you fix this?". De modo parecido, ninguna lengua criolla distingue las preguntas de las afirmaciones a base del orden de las palabras; la diferencia se indica solamente con la entonación.

Considérese la frase "A gon' full Angela bucket". Inaceptable en inglés, es perfectamente admisible en el criollo hawaiano, en el de la Guayana o en cualquier otro de los criollos relacionados con el idioma inglés. La frase es equivalente a la inglesa "I'm going to fill Angela's bucket" ["Voy a llenar el cubo de Angela"], pero difiere de la estructura de ésta en los siguientes puntos: primeramente, el pronombre de primera persona "I" es reducido a "A"; en segundo lugar, se omite el verbo auxiliar "am"; en tercer lugar, se usan las

FORMA VERBAL
FORMA BASE ("HE WALKED"; "HE LOVES")
ANTERIORIDAD ("HE HAD WALKED"; "HE LOVED")
IRREALIDAD ("HE WILL/WOULD WALK"; "HE WILL/WOULD LOVE")
NO PUNTUAL ("HE IS/WAS WALKING")
ANTERIOR+IRREAL ("HE WOULD HAVE WALKED"; "HE WOULD HAVE LOVED")
ANTERIOR+NO PUNTUAL ("HE WAS/HAD BEEN WALKING")
IRREAL+NO PUNTUAL ("HE WILL/WOULD BE WALKING")
ANTERIOR+IRREAL+NO PUNTUAL ("HE WOULD HAVE BEEN WALKING")

6. LA CONJUGACION DEL VERBO es similar en todas las lenguas criollas, pese a superficiales diferencias léxicas. Por lo demás, el sistema criollo es enteramente distinto del que se da en el inglés y en la mayoría de las restantes lenguas. La tabla muestra las conjugaciones, en el criollo hawaiano, en el criollo haitiano y en sranan (criollo de base inglesa hablado en Surinam, antes Guayana holan-

formas "go" o "gon" para indicar el tiempo futuro; en cuarto lugar, se omite en el infinitivo la palabra "to"; en quinto lugar, el adjetivo "full" es empleado como si fuese un verbo transitivo; y, en sexto lugar, se omite la señal de la posesión "-'s". Todos estos rasgos son característicos de las lenguas criollas, pero la frase de marras no fue pronunciada por un criolloparlante, sino por la hijita de tres años de un lingüista angloparlante.

Cuando un aspecto del idioma local encaja bien en la estructura del criollo, los niños dejan de cometer errores que, de lo contrario, parecerían de lo más natural. Por ejemplo, los niños que aprenden el inglés adquieren el sufijo "-ing", que expresa duración, a una edad muy temprana. Aun antes de tener los dos años muchos pequeños dicen ya cosas como "I sitting high chair", frase en la que el verbo expresa una acción continuada. Parece que sería de esperar que tan pronto como el sufijo fuese adquirido se le aplicase a cualquier verbo, exactamente como el sufijo "-s", que indica en inglés el plural, suele ser con frecuencia puesto también, por errónea generalización, a sustantivos tales como "foot" (pie) y "sheep" (oveja) [cuyos plurales son "feet" y "sheep"].

Uno esperaría, pues, que los niños pronunciaran frases tan poco gramaticales como "I liking Mommy" ["Yo queriendo a mamaíta"] y "I wanting candy" ["Yo necesitando azúcar (o caramelo")]. Lo curioso es que errores así no se oyen casi nunca. Los niños parecen tener un conocimiento implícito de que los verbos ingleses tales como "like" y "want", llamados verbos declarativos (*stative verbs*), no pueden marcarse con el sufijo "-ing" para indicar duración. La distinción entre verbos declarativos y no declarativos es, empero, fundamental para las lenguas criollas, y en éstas tampoco se puede emplear con un verbo declarativo ningún indicador de acción continuada.

La distinción entre referencia específica y no específica, de la que ya me ocupé más arriba, es un rasgo importante de las lenguas criollas. En inglés tal distinción puede ser sutil, pero a pesar de ello los párvulos se hacen con la misma fácilmente. Michael P. Maratsos, de la Universidad de Minnesota, construyó una serie de frases que los niños debían completar a base de tener en cuenta, para hacerlo, la distinción entre referencia específica y no específica. Por ejemplo, la frase "Juan nunca ha leído un libro", que hace referencia no específica al sustantivo "libro", puede completarse con la frase "y nunca leerá un libro"; pero no puede completarse con la frase "y nunca leerá el libro". Asimismo, la frase "Juan leyó un libro ayer", en la que se presupone un libro específico, concreto, puede ser completada con la frase "y le gustó el libro"; no puede serlo con la frase "y le gustó un libro". Niños de sólo tres años de edad fueron capaces de hacer tales distinciones con acierto alrededor del 90 por ciento de las veces.

Deberán llevarse a cabo muchos más estudios sobre la adquisición del lenguaje antes de que la estructura de las lenguas criollas se pueda aceptar firmemente como la base de la adquisición del lenguaje inicial. Daniel Isaac Slobin, de la Universidad de California en Berkeley, ha sugerido que hay un conjunto de procesos que los niños aplican a cualquier lenguaje que oyen, la por él llamada gramática infantil básica. En su trabajo más reciente, no publicado aún, cita Slobin datos de varias lenguas en apoyo de su hipótesis, y hoy se va viendo que la gramática infantil básica y las lenguas criollas tienen mucho en común.

Si las lenguas criollas representan la manifestación de un programa neurológicamente determinado del desarrollo infantil, resulta que Psamético no andaba tan descaminado ni era tan loco como se le supuso. Quizá sea posible descubrir, al menos en líneas generales, la estructura del lenguaje humano en los primeros estadios de su desarrollo. Más aún, al tratar de reconstruir tal lenguaje acaso den los lingüistas con respuestas a preguntas que el faraón ni siquiera se hizo: ¿Cómo se originó el lenguaje humano? ¿Cuáles son los requisitos mínimos para que algo como el lenguaje surja en una especie? Si tales preguntas pudiesen ser respondidas o al menos formuladas de modo preciso y coherente, estaríamos mucho más cerca de comprender lo que hace a la especie humana diferente de las demás.

VERBOS NO DECLARATIVOS			VERBOS DECLARATIVOS		
CRIOLLO HAWAIANO	CRIOLLO HAITIANO	SRANANO	CRIOLLO HAWAIANO	CRIOLLO HAITIANO	SRANANO
HE WALK	LI MACHÉ	A WAKA	HE LOVE	LI RÊMÊ	A LOBI
HE BIN WALK	LI TÉ MACHÉ	A BEN WAKA	HE BIN LOVE	LI TÉ RÊMÊ	A BEN LOBI
HE GO WALK	L'AV (A) MACHÉ	A SA WAKA	HE GO LOVE	L'AV (A) RÊMÊ	A SA LOBI
HE STAY WALK	L'AP MACHÉ	A E WAKA	—	—	—
HE BIN GO WALK	LI T'AV (A) MACHÉ	A BEN SA WAKA	HE BIN GO LOVE	LI T'AV (A) RÊMÊ	A BEN SA LOBI
HE BIN STAY WALK	LI T'AP MACHÉ	A BEN E WAKA	—	—	—
HE GO STAY WALK	L'AV AP MACHÉ	A SA E WAKA	—	—	—
HE BIN GO STAY WALK	LI T'AV AP MACHÉ	A BEN SA E WAKA	—	—	

desa), para los verbos declarativos y no declarativos. Verbos declarativos son aquellos que, como "like", "want" y "love", no pueden formar el aspecto no puntual; en inglés, por ejemplo, no se puede añadir "-ing" a un verbo declarativo conjugado. La forma básica del verbo remite al presente para los verbos declarativos y al pasado para los no declarativos. El tiempo anterior equivale aproximadamente al tiempo pasado inglés tratándose de los verbos declarativos y al pasado perfecto inglés si se trata de los no declarativos. El modo irreal abarca el futuro, el condicional y el subjuntivo ingleses. En todas las lenguas criollas la partícula indicativa de la anterioridad precede a la de la irrealidad, y ésta precede a la que indica la no puntualidad. Sin embargo, en el criollo hawaiano "He bin go walk" ha llegado a significar "He walked" en vez de "He would have walked", y las formas "He bin stay walk", "He go stay walk" y "He bin go stay walk", aunque muy difundidas antes de la Segunda Guerra Mundial, están hoy casi extinguidas debido a la creciente influencia del inglés en las islas Hawai. Las equivalencias inglesas puestas entre paréntesis pretenden sólo proporcionar una ayuda aproximada para entender el significado.

Temas metamágicos

Deformaciones de parquets: motivos de baldosas que evolucionan gradualmente en una dirección

Douglas R. Hofstadter

¿En qué consiste la diferencia entre la música y las artes plásticas? Si se me plantease la cuestión no dudaría en la respuesta. A mi juicio, la principal diferencia entre una y otras es de carácter temporal. En la obra musical, el tiempo interviene intrínseca e inherentemente; en las artes plásticas, no. Con mayor precisión: las piezas musicales consisten en sonidos que han de ser tocados y escuchados en un orden y a una velocidad específicos. La música es, por consiguiente, unidimensional; está ligada a los ritmos de nuestra existencia. Por contraste, en las artes plásticas las obras son por lo general bidimensionales o tridimensionales. Raramente tienen las pinturas o esculturas incorporadas un "orden intrínseco" de contemplación al que la mirada tenga que ajustarse. Las esculturas móviles y otras piezas de arte cinético pueden ser cambiantes en el tiempo, pero por lo común carecen de estados iniciales, finales o intermedios específicos. Somos libres de comenzar y dejar su contemplación a nuestro gusto.

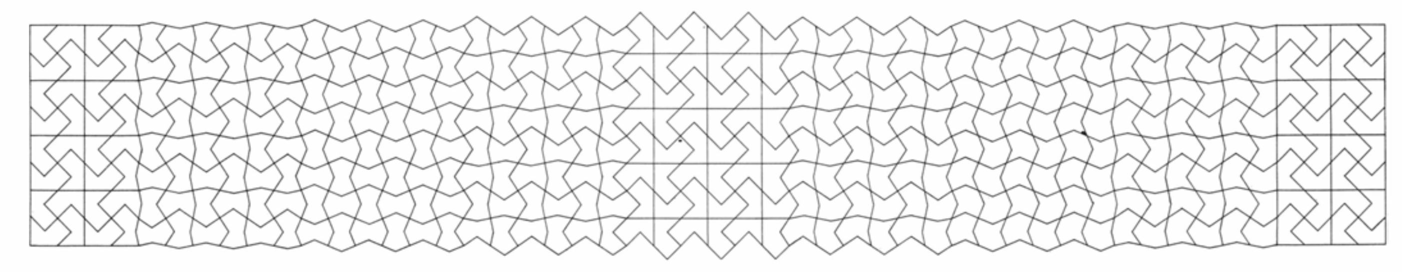
Hay, evidentemente, excepciones a esta generalización. Los grandes frisos y cicloramas históricos del arte europeo, o los intrincados rollos de seda o pergamino de carácter pastoril del arte asiático, que pueden alcanzar el centenar de metros, nos sirven de ejemplo. Estos tipos de artes visuales imponen una determinada ordenación temporal y una cierta velocidad de examen al ojo que los contempla. Hay en ellos un punto de partida y un final. Por lo común, como sucede en la narrativa, estos puntos representan estados de relativa calma, especialmente el final. En el espacio intermedio se van creando y resolviendo diversas formas de tensión con un ritmo visual idiosincrático, aunque grato. Los estados extremos, más apacibles, suelen ser ordenados y visualmente simples, mientras que los estados intermedios, de mayor tensión, son por lo general más caóticos y visualmente confusos. Al sustituir la palabra "visual" por el término "aural", puede decirse otro tanto de la música.

Durante muchos años he dado vueltas a la idea de plasmar gráficamente la esencia de la experiencia musical. Tengo yo mi propia opinión acerca de cómo puede esto conseguirse; más aún, he pasado varios años tratando de elaborar una forma de música visual. No pienso, por otra parte, que haya una forma exclusiva de llevar a cabo esta tarea de "transcripción", y con frecuencia me he preguntado cómo podrían otros enfocar este problema. He visto, en efecto, unos cuantos de estos intentos, si bien la mayoría me han parecido infructuosos. Un llamativo contraejemplo a cuanto digo es el conjunto de "deformaciones de parquets" metacompuestos por William S. Huff, profesor de diseño arquitectónico de la Universidad estatal de Nueva York en Bufalo (SUNY).

Tengo motivos serios para decir "meta-compuestos". Huff no ha ejecutado jamás por sí mismo una sola deformación de parquet. Pero ha educido de sus discípulos centenares de ellas. Y al hacerlo así ha llevado esta forma artística a un alto grado de refinamiento. Podríamos asimilarlo al director de una buena orquesta. Aunque el director no produzca durante el concierto por sí mismo sonido alguno, el mérito, la calidad, el empaste del sonido producido es a él atribuido. No podemos sino conjeturar el esfuerzo de preparación y ensayo que el concierto ha exigido.

Otro tanto ocurre con William Huff. Durante 20 años sus alumnos de SUNY en Bufalo, y también de la Universidad Carnegie-Mellon, han sido por él aguijados a dejar volar su imaginación; gracias al concepto que Huff tiene de calidad han salido a la luz algunos muy bellos resultados. No sólo ha impulsado a sus alumnos a la producción de trabajos sobresalientes, sino que ha seleccionado cuidadosamente las que considera piezas más perfectas, conservándolas en archivo. Por este motivo aludiré yo a "creaciones de Huff", si bien entendidas siempre en este sentido indirecto de meta-creaciones.

Sin ánimo de restar mérito a los estudiantes que ejecutaron las distintas piezas, hay un sentido de "mérito" más amplio que le corresponde exclusivamente a Huff, quien ha dado forma por sí mismo a esta modalidad artística. Permítaseme una analogía. Las gacelas son animales maravillosos, pero no son ellas mismas, sino las presiones selectivas de la evolución las responsables de sus cualidades únicas y admirables. Los comentarios y juicios de Huff han desempeñado aquí el papel de esas impersonales presiones selectivas de carácter evolutivo, y gracias a ellos se ha ido



1. Una deformación de parquet titulada "Biestable gamado"

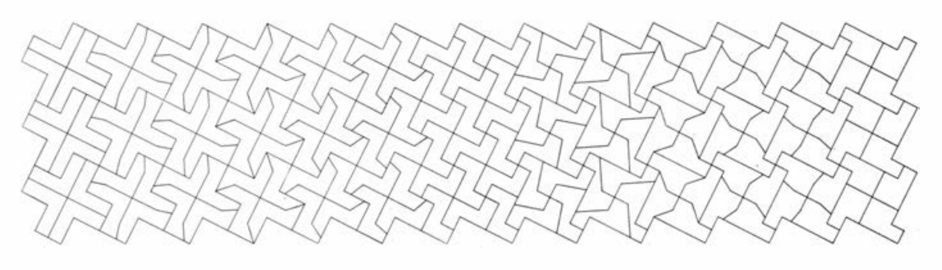
moldeando una tradición dinámica y viva, una "especie" artística ejemplificada y avivada con cada nueva creación.

Todo cuanto en esta a modo de presentación queda por decir es aclarar el significado de "deformación de parquet". En realidad es casi un término auto-definido. Tradicionalmente, un parquet es un entarimado de piezas regulares de madera noble que forman elegantes mosaicos; y una deformación es una deformación. Los parquets de Huff son más abstractos: son teselaciones o embaldosados del plano, diseñados idealmente con segmentos rectilíneos y arcos curvos de grosor nulo. Las deformaciones no son tampoco arbitrarias; por el contrario, han de satisfacer dos requisitos básicos: (1) solamente debe haber cambio en una dimensión, con lo que es posible percibir una progresión temporal por la cual una teselación va gradualmente convirtiéndose en otra, y (2), en cada etapa el motivo diseñado ha de constituir una teselación regular del plano, es decir, ha de existir una célula unitaria capaz de combinarse consigo misma y llegar a recubrir exactamente un plano ilimitado.

De estas ideas tan sencillas afloran creaciones de belleza sorprendente. Explica Huff que la inspiración inicial se la proporcionó, allá por 1960, un grabado de M.C. Escher titulado "Día y Noche". En esta obra, formas de pájaros que teselan el plano van gradualmente deformándose, a medida que la mirada va descendiendo en su examen, hasta adquirir forma rómbica, que recuerda una vista aérea de campos cultivados. Como es bien sabido, Escher adquirió gran fama por sus teselados, tanto puros como distorsionados, así como por otros mágicos juegos que planteó entre arte y realidad.

Mientras que las teselaciones de Escher se basan casi siempre en formas animales, Huff decidió limitar su campo de acción a formas puramente geométricas. Es, en cierto modo, como si un compositor decidiese ajustarse a las formas musicales más austeras y prohibirse absolutamente todo cuanto pudiera conjurar la idea de "programa" (esto es, algún tipo de imagen o argumento subyacente a los sonidos). Uno de los efectos que conlleva tal decisión es que la belleza y el interés visual han de provenir enteramente de la complejidad y sutileza de la interacción de formas abstractas. Nada hay que "encandile" al ojo, como sucede con las imágenes de animales; tan sólo está la experiencia perceptual, desprovista de ornamento.

A causa de la linealidad de esta forma artística, Huff la ha asimilado a música visual. Confiesa: "Aunque mi ignorancia musical es espectacular, no obstante ser casi sordo para distinguir unos tonos de otros y a pesar de detestar las lecciones de piano que padecí (y poderme, sin embargo, sentir subyugado por Bach, Vivaldi o Debussy), hago que mis alumnos 'lean' sus diseños, a la manera que imagino yo un músico puede examinar una partitura, buscando los temas, los acontecimientos, los intervalos, el número de pasos de un acontecimiento a otro, los ritmos, las repeticiones (que de no estar bien controladas pueden tanto ser destructivas como reforzantes). Son éstas composiciones de carácter más bien temporal que espacial (a pesar de que todas las composiciones predominantemente temporales necesariamente contienen elementos espaciales, y viceversa. V.g., el fotograma individual, elemento básico de la película cinematográfica.)".



2. *"Transición"*

¿Cuáles son los elementos básicos de una deformación de parquet? Ante todo hay que especificar la clase de parquets permisibles. A este respecto, Huff escribe: "Nuestro juego no es de Escher; mejor dicho, jugamos con reglas más estrictas. Nos valemos únicamente de teselaciones de tipo *A* (donde las teselas son directamente congruentes). No utilizamos, como él hace, teselas de tipos *A* y *A'* (donde las teselas tal vez tengan que sufrir una simetría para poder ser superpuestas), si bien el ejemplo llamado Dual infringe excepcionalmente esta regla. Finalmente, tampoco utilizamos teselas de tipos *A* y *B* (i.e., dos teselas diferentes acoplables), pues un par de tales baldosas puede siempre ser considerado subdivisión de una única tesela mayor".

El otro componente básico es el repertorio de procedimientos normalizados de deformación. Entre los típicos se encuentran prolongar o acortar líneas; hacer girar una línea; introducir en algún punto interior de un lado una "bisagra", para poderlo "doblar"; introducir una "protuberancia", un "diente" o un "grano" (una pequeña intrusión o extrusión de formas sencillas) en mitad de una línea o un vértice; hacer deslizar, girar o ampliar, o contraer, grupos de líneas que formen una subunidad natural, así como variaciones sobre estos temas. Para comprender estas descripciones es preciso darse cuenta de que, al aludir a "líneas" o "vértices", estamos refiriéndonos a líneas o vértices de una baldosa unitaria; por consiguiente, cuando una tal línea o vértice se modifiquen todas las líneas y vértices homólogos que desempeñen en las copias igual papel habrán de sufrir los mismos cambios. Puesto que algunas de tales copias pueden estar en ángulo recto (o en otros ángulos) con respecto a la baldosa maestra, un cambio de aspecto localmente ingenuo puede inducir en puntos homólogos interacciones inesperadas de consecuencias plásticas sorprendentes.

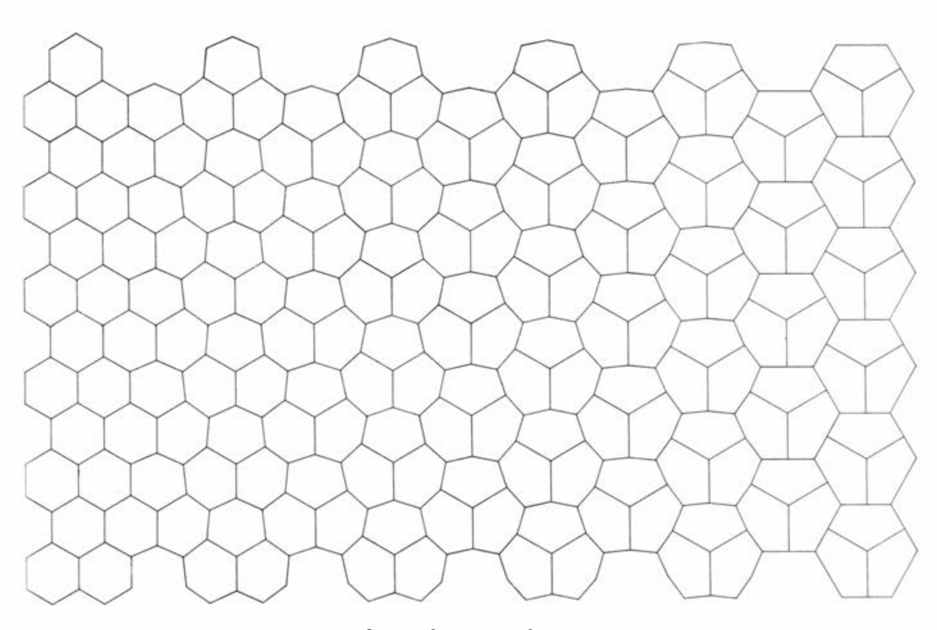
Sin más preámbulo, procedamos a examinar algunos ejemplos concretos. Fijémonos en el titulado "Fylfot Flipflop" ("Biestable gamado") [*figura 1*]. Es uno de los primeros, ejecutado por Fred Watts en 1963, siendo alumno de la Carnegie-Mellon. Dejando correr la mirada sobre la línea superior se tiene una sensación inconfundible de estar oteando una minúscula cadena de montañas. Comienza en cada borde con una meseta perfectamente plana, para seguir en suaves colinas, que van haciéndose más altas y abruptas, para terminar convertidas en escarpados picachos; pasado el centro, los picachos van tornándose en montañas y colinas, en estribaciones cada vez más atenuadas, hasta volver a la planicie. Todo esto salta a la vista. Más sutil de percibir es la línea inmediatamente inferior, cuyo zigzagueo está desfasado 180 grados con respecto a la primera. Observemos que el centro de esta segunda línea es completamente llano; es una región perfectamente plana flanqueada, a ambos lados, por regiones cada vez más dentadas. Le subyacen siete líneas más horizontales. Así pues, si lográsemos eliminar por completo las líneas verticales veríamos nueve líneas horizontales apiladas unas sobre otras; aserradas

en su centro las de numeración impar; lisas y llanas en él, las de lugar par.

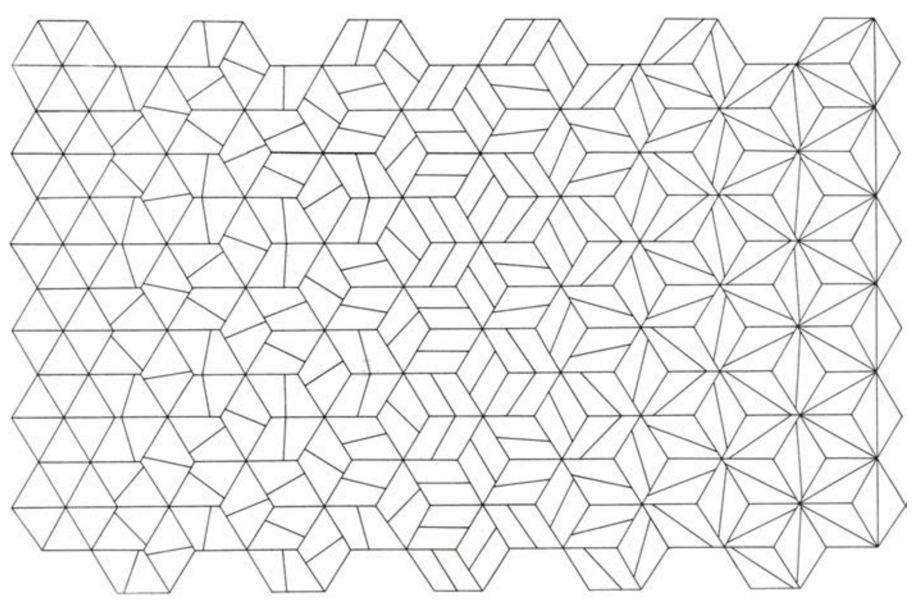
¿Y qué decir de las líneas verticales? Las líneas que enmarcan por ambos lados la figura son rectas verticales perfectas. Sus vecinas inmediatas, sin embargo, son lo más aserradas posible, formadas por dobleces en ángulo recto hacia adelante y atrás. La siguiente divisoria vertical al movernos hacia el centro es prácticamente una recta. Hay después otra línea fuertemente zigzagueante, y así sucesivamente. Conforme vamos recorriendo de un lado a otro la figura vemos que los dientes de sierra son cada vez menos incisivos y las líneas lisas van haciéndose más y más dentadas, hasta que en el centro los papeles de unas y otras están completamente invertidos. El proceso continúa entonces, con lo que para cuando hayamos llegado al otro extremo la situación ha vuelto a la normalidad. Si pudiéramos eliminar las líneas horizontales veríamos un motivo sencillo de líneas muy dentadas alternando con otras menos quebradas.

Al superponer estos motivos extraordinariamente sencillos e independientes —el horizontal y el vertical— lo que emerge es un festín perceptual de riqueza insospechada. En los extremos izquierdo y derecho el ojo capta las cruces gamadas de ambas orientaciones, albergadas en cuadrados perfectos. En el centro detecta el ojo inmediatamente que las esvásticas han desaparecido todas, sustituidas por cruces perfectas, enmarcadas en molinetes.

Pero enseguida se produce una curiosa inversión perceptual. Desplazando el foco de atención diagonalmente en medio molinete veremos, justo ante nuestros ojos, una cruz gamada. En realidad, súbitamente todo el campo central, donde estábamos viendo cruces rectas inscritas en molinetes, ha quedado poblado de esvásticas. Y recíprocamente desde luego: cuando ahora miramos los extremos del diseño vemos por todas partes cruces rectas inscritas en molinetes. ¡Las esvásticas han desaparecido! Aunque el diseño es de una simplicidad sorprendente, el efecto visual que produce nos coge desprevenidos.



3. *"Abeja vacilante"*



4. *"Consternación"*

Nos tropezamos aquí con un ejemplo sencillo de un efecto visual omnipresente, llamado "reagrupamiento", en el que las líneas que delimitan la casilla unitaria se desplazan de tal suerte que saltan a la vista estructuras antes sumergidas e invisibles, al tiempo que, recíprocamente, estructuras que hacía un momento resultaban evidentes son ahora invisibles, por haber quedado escindidas en piezas conceptualmente disjuntas en el reagrupamiento, esto es, en el desplazamiento de los límites de percepción. Se trata de un fenómeno con tanto de perceptual como de conceptual, que la sutil combinación de ojo y cerebro encargada de reconocer formas y motivos encuentra delicioso.

Un segundo ejemplo de reagrupamiento lo tenemos en "Crossover" ("Transición") ejecutado por Richard Lane, también de Carnegie-Mellon, en 1963 [*figura 2*]. En su centro se produce algo verdaderamente asombroso; pero no seré yo quien lo explique. Mírelo con atención y descúbralo por sí.

Incidentalmente, quedan en "Fylfot Flipflop" rasgos por aclarar. Parece al principio como si presentara simetría axial. Por ejemplo, todas las esvásticas del extremo izquierdo son sinistrorsum, mientras todas las del extremo derecho son dextrorsum. Hasta aquí hay simetría. En el centro, sin embargo, todas las esvásticas van a izquierdas, lo que forzosamente implica violar la simetría. Además, todas las fases de deformación a "un cuarto" y a "tres cuartos", que debieran ser una simétrica de otra, no guardan la menor semejanza. ¿Podrá el lector desvelar la causa lógica de esta sutil asimetría entre los lados derecho e izquierdo?

Esta pieza ejemplifica también otra de las formas en que las deformaciones de parquets se asemejan a la música. Una célula unitaria, o mejor dicho, una sección transversa vertical formada por una columna de casillas unitarias se

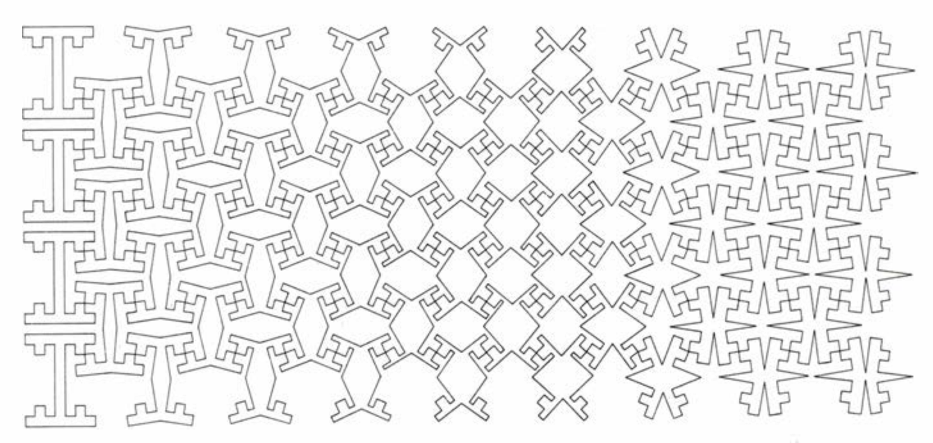
asemeja a una medida musical. El regular latido de la pieza musical está dado por la repetición de células unitarias a lo largo de la página. Y el fluir de las líneas melódicas a través de los límites de las medidas se traduce en el flujo de una línea —semejante al perfil de las montañas lejanas— que va atravesando muchas células unitarias.

Al analizar las relaciones entre pautas matemáticas y musicales inevitablemente se recurre a la música de Bach; no es ésta ocasión de excepciones. Me vienen a las mientes, en particular, algunas de las piezas de Bach más texturalmente uniformes; por ejemplo, ciertos preludios de "El Clavecín bien temperado", donde cada medida contiene un cierto motivo, ejecutado una o dos, si no más veces. De medida en medida el motivo va sufriendo lenta metamorfosis, serpeando en el decurso de muchas medidas desde una región del espacio armónico hasta otras muy alejadas, para luego lentamente retornar. Podemos, más concretamente, escuchar (o leer las partituras de los n.^{os} 1 y 2 del Libro I, y los n.^{os} 3 y 15 del Libro II. Muchos de los otros preludios presentan en ciertos pasajes esos mismos rasgos, pero no en su totalidad.

Mal podría decirse que Bach se dispuso deliberadamente a jugar con los sistemas perceptuales de sus oyentes. Los artistas de su siglo, aunque en ocasiones hicieran juegos de percepción, estaban mucho menos fascinados de lo que nosotros lo estamos por estas cuestiones, tenidas hoy por parte importante de la psicología de la percepción. Sin duda que fenómenos como el reagrupamiento hubieran causado en Bach curiosa perplejidad, y por eso, a veces desearía yo que Bach hubiera podido conocer determinados efectos y jugado con ellos, si bien tengo que recordarme que el tiempo que Bach pudiera haber dedicado a juguetear con estas ideas recién nacidas nos hubiera sido detraído del que dedicó a producir las obras maestras que conocemos y amamos. Así pues, ¿qué justificación hay para trastear con algo tan precioso?

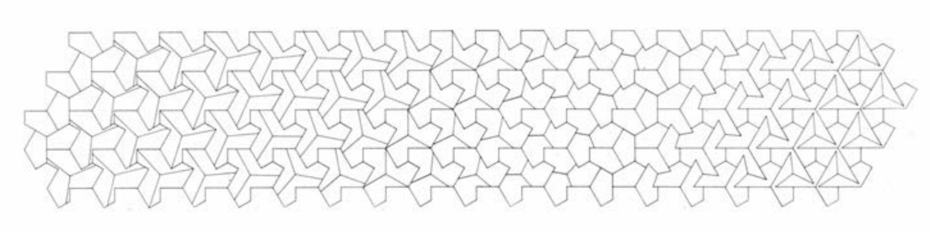
Por otra parte, no encuentro ciento por ciento convicente este razonamiento. Si jugamos a imaginar cómo pudo ser el pasado, ¿quién nos obliga a conservar constante la duración de la vida de las personas famosas? Si podemos imaginar a Bach opinando sobre psicología de la percepción, ¿por qué no podríamos imaginar que a su vida le han sido concedidos unos cuantos años más que le permitieran explorar el nuevo tema? Después de todo, la única imposición *divina* (es decir, absoluta e inexorable) que pese sobre los años concedidos a Bach es que, sumados con los de Mozart, den un total de 100, ¿no es verdad? Por tanto, si damos a Bach cinco años extra no hacemos sino restárselos a Mozart. Doloroso, qué duda cabe, pero no una tragedia. ¡Podríamos incluso dejar que Bach alcanzase los cien años, y ahorrarle a Mozart la molestia de existir!

Aunque cuesta trabajo imaginar —y sea imposible saber— cómo sería la música de Bach de haber él vivido en el siglo XX, no es desde luego imposible saber cómo habría sido la de Steve Reich de haber *éste* vivido en este siglo. Más aún, estoy en este momento escuchando un disco suyo. Ahora bien, la música de Reich *sí* está atenta a la psicología de la percepción. De un extremo a otro juega con ambigüedades y deslizamientos perceptivos, pivotando de uno a otro ritmo, de un origen armónico a otro, manteniendo continuamente en tensión a sus oyentes, provocándoles estremecimientos y descargas de energía nerviosa. Imaginemos una pieza como el "Bolero" de Ravel, sólo que con granulación mucho más fina, cuyas células temporales en lugar de rondar el minuto rondasen los tres segundos. Sus cambios son tan minúsculos que a veces apenas podemos distinguir si los hay o no, mientras otras veces, de tan bruscos, parecen echársenos encima. ¿Qué pieza de Reich estoy escuchando? No importa demasiado, pues casi todas las suyas cumplen esta caracterización; por probar que no quede; inténtese con "Music for a Large Ensemble", "Octet" o "Violin Phase".

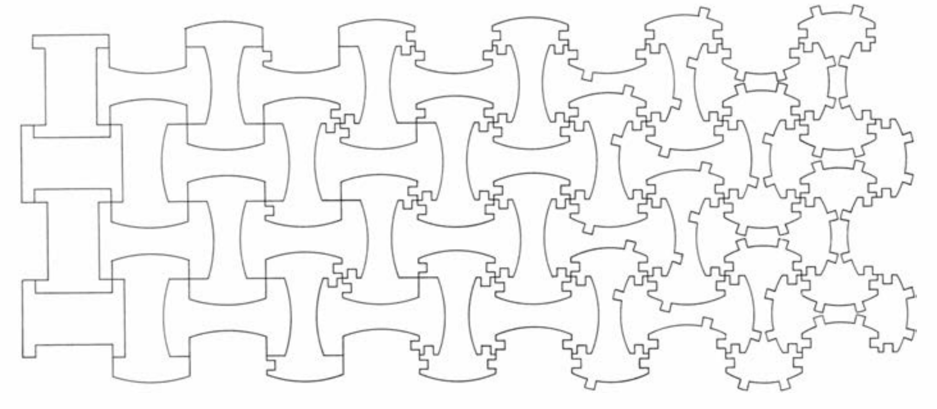


5. "Curiosidad tomada de un antiguo ornamento oriental"

Retornemos a las deformaciones de parquets. "Dizzy Bee" ("La abeja vacilante") ejecutado por Richard Mesnik, de Carnegie-Mellon, en 1964 [*figura 3*], introduce artificios perceptivos de otra naturaleza. La parte izquierda recuerda un panal perfecto, o quizás menos poéticamente, a un perfecto embaldosado de cuarto de baño. Al avanzar hacia la derecha su perfección va quedando en entredicho, conforme la rigidez de la red va dando paso a formas cada vez más redondeadas. Observamos entonces que tres de ellas han sido combinadas, formando una silueta mayor: un superhexágono compuesto por tres pentágonos levemente aplastados. Lo más curioso es que si barremos con la mirada la figura, esta vez de derecha a izquierda, ya no podremos imaginar el extremo izquierdo de modo igual a como antes hacíamos. Ahora, los pequeños hexágonos están sin cesar agrupándose en tríos, si bien las agrupaciones alternan rápidamente. Nuestra mente percibe a modo de "acumulaciones fluctuantes", donde por un segundo se forman grupos, enseguida dispersos, para recombinarse un segundo después. La poética noción de "acúmulos fluctuantes" procede de una famosa teoría del comportamiento de las moléculas de agua, si bien allí los nexos son



6. "Nudo en Y"


7. *"Piñones locos"*

enlaces de hidrógeno y no de carácter mental.

Todavía más mareante, quizá, sea "Consternation", ejecutada por Scott Grady, de SUNY en Buffalo, en 1977 [*figura 4*]. Es ésta otra deformación de parquet donde hexágonos y cubos rivalizan por la supremacía perceptual. Su aspecto es tan complejo y agitado que a duras penas me atrevo a intentar su análisis. En sus regiones intermedias encuentro yo el incitante pseudocaos de las mejores deformaciones creadas por Escher.

Tal vez sea irrelevante —aunque sospecho que no— pero los títulos de muchos de estos estudios evocan las piezas de Zez Confrey, compositor famoso allá por los años veinte por sus fantasías para piano, como "Dizzy Fingers" ("Dedos inseguros"), "Kitten on the Keys" ("La gatita en el teclado") y mi favorita, "Flutter By, Butterfly" ("Revolotea, mariposa"). Era especialidad de Confrey elevar hasta el límite las posibilidades de la música de *rag* sin perder su encanto musical, y algunos de sus logros me parecen tener un atractivo deslumbrante y algo insolente, no muy alejado de las estridencias de esta deformación.

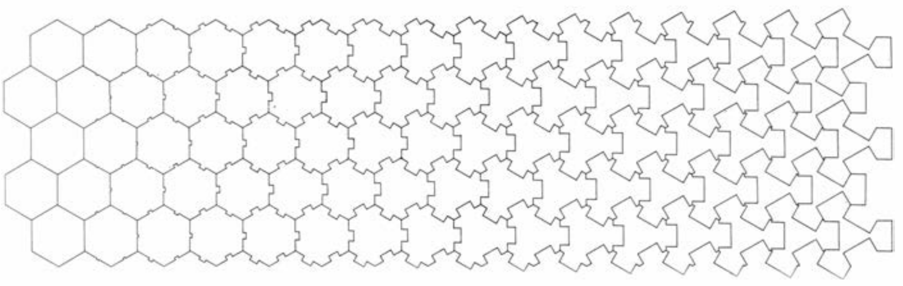
La deformación siguiente, "Oddity out of Old Oriental Ornament" ("Curiosidad tomada de un antiguo ornamento oriental"), ejecutada por Francis O'Donnell, de la Carnegie-Mellon, en 1966 [*figura 5*] está basada en un principio extraordinariamente simple: insertar una "bisagra" en uno de los trazos y, seguidamente, flexionar el trazo por ese punto. La razón de la sorprendente riqueza de los resultados es que la célula unitaria generatriz de la teselación se presenta tanto vertical como horizontalmente, con lo que al doblarla de una forma se induce al mismo tiempo una flexión en dirección transversal; la combinación de ambas flexiones produce esta pauta curiosa.

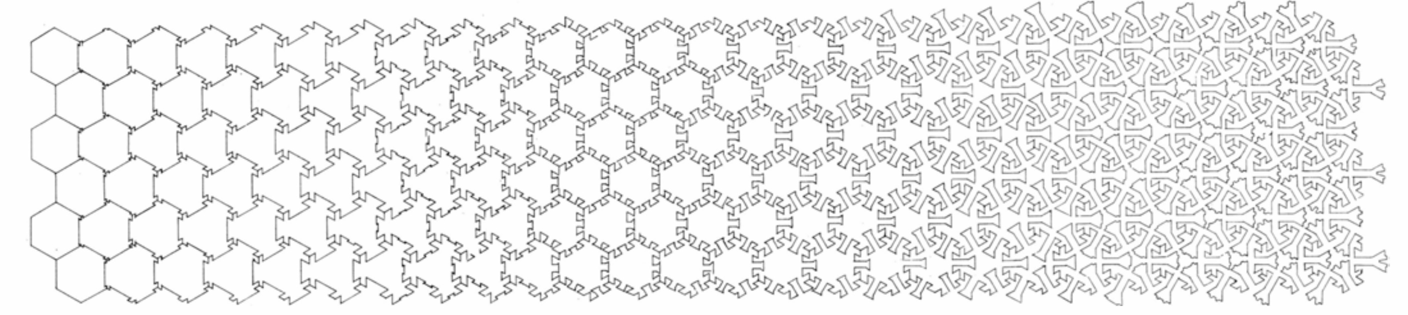
Otra deformación que hace ver los asombrosos resultados que pueden producirse gracias a transformaciones muy simples, pero muy cuidadosamente elegidas, es "Y Knot" ("Nudo en Y"), ejecutada por Leland Chen, de SUNY en Buffalo, en 1977 [*figura 6*]. Mirándola con toda atención nos damos cuenta de que su célula unitaria tiene forma de hélice de tres palas, y de que esta célula unitaria nunca cambia de forma. Todo cuanto cambia es la *Y* apretadamente alojada en la célula generatriz. Y la única forma que tiene de cambiar la *Y* es girando muy lentamente en sentido horario. Hay que confesar que en las últimas etapas del giro ello nos obliga a prolongar un poco segmentos rectilíneos que antes eran de longitud constante, pero ello no cambia en forma alguna el perfil de la casilla unitaria. Es muy notable lo que puede lograrse con simplicidad bien elegida.

Tres de mis favoritas son "Crazy Cogs" ("Piñones locos"), de Arne Larson, Carnegie-Mellon, 1963, "Trifoliolate", de Glen Paris, Carnegie-Mellon, 1966, y "Arabesque" ("Arabesco"), de Joel Napach, de SUNY en Buffalo, 1979 [*figuras 7, 8 y 9*]. Comparten todas ellas el rasgo de ir haciéndose más y más intrincadas conforme se avanza hacia la derecha. La mayoría de las deformaciones anteriores carecen de esta cualidad extrema de ser irreversibles, cualidad característica de estar desarrollándose un proceso evolutivo. No puedo evitar preguntarme si los diseñadores no llegaron a sentirse acorralados, atrapados por su propio diseño, y muy particularmente en "Arabesque". ¿Existe alguna forma de salir de semejante superembrollo que no sea el movimiento retrógrado, deshaciendo nuestros propios pasos? Sospecho que puede haberlo, ¡pero no seré yo quien se ocupe de averiguarlo!

Por contraste, fijémenos en "Razor Blades" ("Hojas de afeitar"), un prolongado estudio del tema de la relativa calma [*figura 10*]. Aunque no está firmado, fue realizado en Carnegie-Mellon en 1966. Lo mismo que "Fylfot Flipflop", la primera de las piezas descritas en el artículo, ésta puede descomponerse en largas y ondulantes líneas horizontales y en estructuras verticales que las atraviesan. Es un poco más fácil verlas si se comienza desde la derecha. Podemos observar, por ejemplo, que justamente debajo del borde superior hay una larga línea serpeante provista de gran número de entalladuras y prominencias; la línea sigue su marcha de derecha a izquierda, y a lo largo de ella va desprendiéndose de las muescas, hasta que en el extremo izquierdo ha degenerado en una onda cuadrada perfecta, que es como en análisis de Fourier son llamadas las formas de onda periódicas semejantes a ésta. Completando esta estructura horizontal hay una estructura vertical parecida, más costosa de describir. El pensamiento que para describirla se me viene a las mientes es el de dos relojes de sobremesa, rectangulares, soportados por pedestales anulados, superpuestos uno al otro. Decida el lector por sí mismo.

Al igual que en "Fylfot Flipflop", cada una de estas pautas tiene interés por sí misma, pero sin duda que el verdadero interés lo crea la osadía de superponerlas. Incidentalmente, no sé yo de ninguna otra obra de arte visual que capte mejor que ésta la imagen de belleza y complejidad de las obras musi-


8. *"Trifoliolate"*



9. *"Arabesco"*

cales de Steve Reich, creada por lentos cambios "adiabáticos" que flotan sobre el caos y el dinamismo frenético del nivel inferior. Al repasar, veo que comencé hablando de calma al comentar esta deformación; hay justificación para esta incoherencia. La respuesta emotiva que suscita la obra de arte, sea visual o sonora, no es estática e invariable. No hay forma de saber cómo responderemos la próxima vez que oigamos o veamos una de nuestras obras favoritas; tal vez nos deje impasibles; tal vez nos conmueva hasta el tuétano. Dependerá de nuestro estado de ánimo, de lo que nos haya acontecido recientemente, de lo que se nos ocurra en ese instante; de muchas eventualidades intangibles. Las reacciones propias pueden cambiar incluso en el curso de pocos minutos, así que no pediré disculpas por mi *lapsus*.

Fijémenos ahora en "Cucaracha", ejecutada por Jorge Gutiérrez, de SUNY en Buffalo, en 1977 [*figura 11*]. A través de una secuencia de modificaciones progresivamente más arbitrarias se pasa desde la geometricidad más incontestable —un retículo de cuadrados perfectos— hasta un estadio próximo a la plena libertad, hasta una danza de figuras extrañas, angulosas, casi orgánicas. Me fascina. ¿Crece o decrece la entropía en este fluir de izquierda a derecha, en esta huída hacia la libertad?

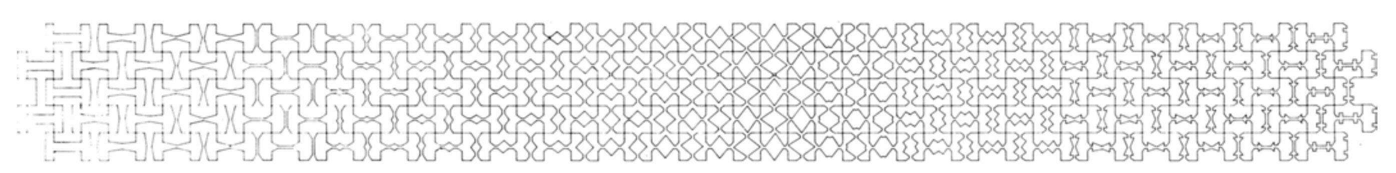
Una deformación donosamente erizada y puntiaguda es la titulada "Beecombing Blossoms" ("Ramilletes en panal") ejecutada por Laird Pylkas, de SUNY en Buffalo, este año [*figura 12*]. Huff me contó que Pylkas estuvo luchando con su deformación durante semanas, y que al cabo, cuando había conseguido resolver todas las dificultades, musitó: ¿Por qué será que siempre resulta tan difícil descubrir lo evidente?

El último estudio que examinaremos será "Clearing the Thicket" ("Desbrozando la maleza"), ejecutado por Vincent Marlowe, de SUNY en Buffalo, en 1979, donde se combinan líneas rectas y curvas, ángulos rectos y cúspides, esvasticoides explícitas de formas cuasicuadradas y huecos circulares implícitos [*figura 13*]. Más que poner de manifiesto mi incapacidad para analizar la feroz complejidad de este diseño preferiría valerme de él como excusa para analizar brevemente la relación entre ciencias de cómputo y creatividad.

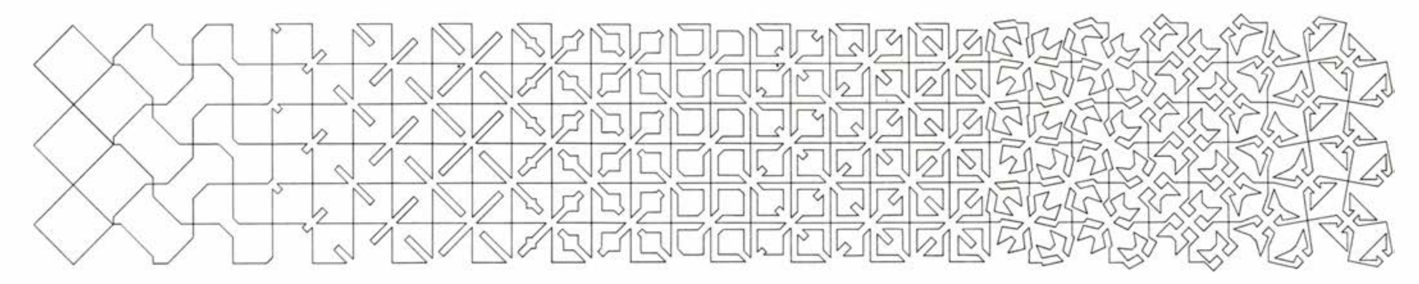
En esta deformación concreta están aconteciendo cosas que no se habían dado en ninguna de las anteriores. Observemos los huecos circulares de la izquierda, que van contrayéndose conforme se avanza hacia la derecha; observemos también que a la derecha hay cuatro "anticírculos" huecos (formas cóncavas compuestas por cuatro arcos circulares vueltos hacia afuera) que van contrayéndose a medida que nos dirigimos hacia la izquierda. Ahora bien, según Huff tal idea no se ha había presentado en ninguna de las deformaciones creadas con anterioridad. Significa esto que algo insólito ha ocurrido aquí: algo genuinamente creativo, inesperado, impredictible, sorprendente, intrigante; lo que no es menos importante, capaz de inspirar a futuros creadores.

Y por tanto se plantea inmediatamente la cuestión: ¿podría un ordenador haber sido capaz de inventar esta deformación de parquet? Bien, así formulada la cuestión está ingenua y deficientemente planteada, pero nos esforzaremos en proveerla de algún significado. Ante todo, es preciso tener presente que el término "ordenador" denota solamente un objeto inanimado, un montaje inerte de metal y semiconductores. Para hacer funcionar este ordenador "desnudo", para poner en marcha este *hardware,* se requiere aportarle programación y energía. La programación consiste en incorporar al *hardware* ciertas pautas y configuraciones específicas, imponiéndole ciertas restricciones y, al tiempo, imbuyéndole metas y objetivos. La energía le "alienta" vida, y lo hace funcionar y actuar de conformidad con restricciones y objetivos.

El segundo punto a dejar claro es que la programación (el *software*) controla lo que la máquina lleva a cabo. La máquina no hace sino cumplir los dictados de los programas, instrucción por instrucción. Mas los programas son a su vez formulaciones de algoritmos, y pueden existir en cierto número de distintas "presentaciones", versiones concretas redactadas en distintos lenguajes o dialectos de programación. Lo verdaderamente importante de la programación no es su aspecto literal, sino algo más abstracto y general, su "arquitectura" global, cuya descripción se hace más cómodamente en lenguaje humano no formalizado. Podríamos decir que nos interesa aquí el plan general, el esquema, la idea central de la programación; no nos interesa, en cambio, su realización final en algún lenguaje específico. Esa tarea podemos dejársela a los aprendices, una vez les hayamos presentado nuestro boceto informal.



10. *"Hojas de afeitar"*



11. "Cucaracha"

Por ello, la cuestión resulta ser mucho menos mundana y sí mucho más filosófica y teórica: ¿existe una arquitectura de la creatividad? ¿Puede haber un plan, un esquema, un sistema de principios, que, de ser claramente elucidados, dieran cuenta de toda la creatividad incorporada a la colección de deformaciones, presentes, pasadas o futuras?

Fijémonos en que estamos preguntando por la *colección* de todas las deformaciones de parquet, no por un trabajo *específico*. Es una perogrullada que cualquier obra de arte específica puede ser re-creada, e incluso reelaborada de varias nuevas formas mediante un ordenador programado al efecto.

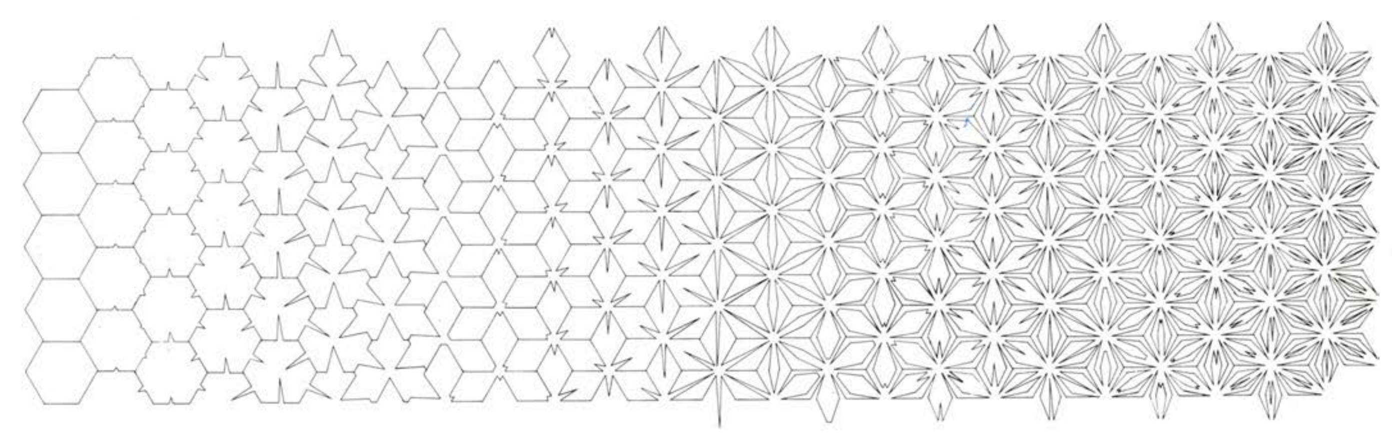
Piet Mondrian, por ejemplo, fue evolucionando a lo largo de un período de muchos años hacia un estilo pictórico idiosincrático y no poco críptico. Es posible, al seguir su evolución a lo largo del tiempo, ver exactamente de dónde partió y hacia dónde se encaminaba. Empero, si nos fijásemos en una sola obra de Mondrian no podríamos apreciar su "momento cinético" estilístico, esa cualidad de estilo en evolución dinámica que todo gran artista manifiesta. Mirar una sola obra, aislada, es como tomar una instantánea de un objeto en movimiento: captamos su posición en ese momento, pero no su sentido e intensidad de movimiento. Tal vez, si la instantánea estuviera algo movida podría captarse algo del sentido de movimiento, a costa de cierta pérdida de información posicional. Sin embargo, contemplando aislada una sola obra de arte no se producirá este desdibujamiento mental, que funda su estilo con el de otras obras recientes o prontas a venir; se tiene información posicional exacta ("¿cuál es el estilo actual?"), pero se carece de indicación alguna sobre el movimiento ("¿cuál era el estilo anterior?" y "¿hacia donde va?").

Hace algunos años, A. Michael Noll, matemático y creador de obras artísticas con auxilio de ordenador, tomó un único cuadro de Mondrian, un estudio abstracto, de carácter geométrico, compuesto al parecer por elementos aleatorios, y extrajo de él ciertos datos estadísticos sobre sus configuraciones. A partir de ellos programó un ordenador para que generase un gran número de pinturas pseudo-mondrianas, que tuvieran iguales o distintos valores de los parámetros encargados de controlar el grado de aleatoriedad de las figuras. Seguidamente Noll expuso los resultados ante un público ignorante del proceso. La reacción fue interesante: ¡Uno de los falsos Mondrian recibió acogida mejor que el auténtico!

Lo cual puede ser no poco gracioso, provocativo incluso, pero nos da también una señal de aviso. Demuestra que un ordenador puede ser programado para que imite —e incluso imite bien— aspectos estilísticos matemáticamente expresables de una obra de arte dada. Y nos advierte también: "¡Desconfíe de las imitaciones!"

Volvamos a las deformaciones de parquets. Indudablemente, sería posible sin demasiadas dificultades programar un ordenador para que crease una deformación *específica* o ligeras variaciones de ella. Sencillamente, no hay tantos parámetros a considerar en cada una de las deformaciones individuales. Sin embargo la esencia de la creación artística no reside en asignar valores concretos a ciertos parámetros. Es mucho más profunda: es preciso equilibrar y ponderar una miríada de pulsiones mentales intangibles y casi todas inconscientes, acto de enjuiciamiento cuya consecuencia última es que muchas elecciones conceptuales lleguen a sumarse e integrarse en una obra de arte, tangible, perceptible y medible.

Una vez terminada y existente como tal, puede ser que los estudiosos y los críticos detecten en la obra de arte ciertas cualidades que se presten a ser cuantificadas. *Cualquiera* puede recoger datos estadísticos de una obra de arte una vez que ésta se encuentre terminada y a su disposición y escrutinio;



12. "Ramilletes en panal"

pero la facilidad para hacerlo puede obscurecer el hecho de que nadie pudo *a priori* haber dicho qué tipos de observables matemáticos resultarían relevantes para captar los aspectos estilísticos de la obra todavía no vista.

El enfoque que el propio Huff da al problema de la mecanización del arte de las deformaciones de parquets es paralelo y muy cercano al mío. Considera Huff que en la actualidad podrían formularse algunos principios fundamentales que permitieran a un ordenador generar por sí ciertas creaciones nuevas propias, si bien estereotipadas. Huff subraya, no obstante, que ocasionalmente sus alumnos le presentan ideas que contravienen las reglas pero que encantan al ojo por razones más profundas de las que él es capaz de expresar verbalmente. Por esta razón, el sistema de reglas explícitamente válidas ha ido ampliándose gradualmente.

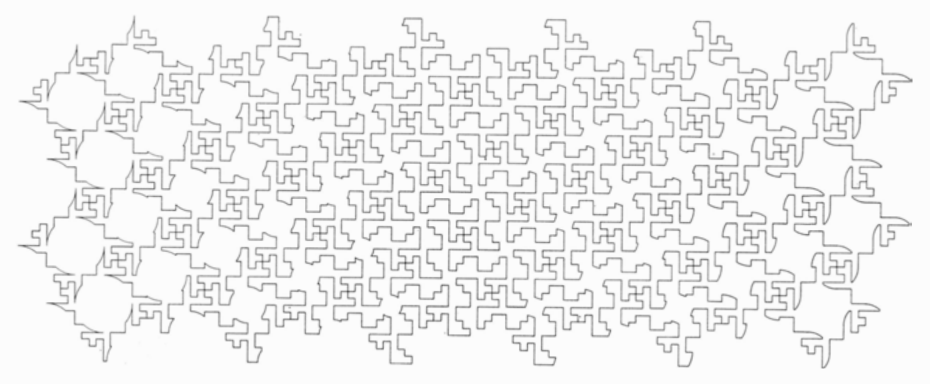
Comparando la creatividad que pueda requerir una deformación de parquet con la creatividad de un gran músico, Huff escribe: "No soy quien para decir en qué consistía el genio de Bach, pero sí he trabajado con un gran arquitecto norteamericano, Louis Kahn (1901-1974), e imagino que algo semejante debió acontecer con Bach. A partir de consideraciones morales, espirituales, filosóficas o estéticas Kahn formulaba modos de hacer o no hacer una cosa. Sus discípulos llegaron a conocer muchas de tales consideraciones, y algunos de los mejores eran capaces de imitarle bastante bien (aunque no perfectamente). Pero conforme el propio Kahn iba madurando, introducía nuevos principios que trajeron nuevas transformaciones de sus obras, llegando incluso ocasionalmente a descartar alguna antigua regla. Por consiguiente, Kahn se encontraba siempre algunos pasos por delante de sus imitadores, quienes sabían cómo *había sido,* pero no podían imaginar cómo *iba a ser.* Por eso, una pieza inédita de Bach generada por ordenador sería un interesante ejercicio. Pero no es Bach; no es la obra proyectada que Bach nunca llegó a escribir, no es la obra pensada al día siguiente de su muerte."

El verdadero problema es: ¿qué tipo de arquitectura es responsable de la *totalidad* de estas ideas...? ¿Hay *alguna* tal vez capaz de dar cuenta de todas ellas? Yo diría que la habilidad para diseñar buenas deformaciones de parquet es probablemente engañosa en el mismo sentido que lo pueda ser la habilidad de jugar bien al ajedrez: parecen ser más matemáticas de lo que son.

Una vez terminada la partida y analizada *a posteriori* una jugada brillante puede parecer la jugada lógica, la "que exigía la situación". Pero las jugadas brillantes no se nos ocurren a consecuencia de un minucioso análisis lógico como el efectuado una vez acabada la partida; no hay tiempo entre jugadas para comprobar todas las consecuencias lógicas de un movimiento. Las buenas jugadas ajedrecísticas parecen más bien emanar de la organización de una buena mente ajedrecística; de un conjunto de percepciones dispuestas y situadas de modo tal que cierto tipo de ideas se nos vienen a las mientes tan pronto se presentan ciertas pautas o indicaciones en la partida. Por debajo de la habilidad adquirida en cualquier actividad humana, no sólo en ajedrez, subyace la facultad que las percepciones tienen para desenterrar y reavivar viejos recuerdos. Lo que sucede en ajedrez es que tal habilidad es particularmente engañosa, porque una vez manifiesta puede ser justificada por un análisis lógico, lo que parece sugerir que la feliz idea en cuestión tuvo en realidad origen lógico.

Tenemos otra de estas engañosas habilidades en el arte de la composición melódica. Los de mentalidad matemática tienden a ver las notas como números de una escala, y secuencias de números en las melodías. Por consiguiente, parece como si la belleza de una encantadora melodía pudiera ser descrita en términos matemáticos sencillos. Hasta el momento, empero, no ha habido una sola fórmula capaz de generar buenas melodías. Podemos evidentemente tomar una melodía cualquiera y ajustarle una fórmula que la genere, o que genere variaciones sencillas en torno a ella. Mas este proceder es retrospectivo, no prospectivo. Las más brillantes jugadas de ajedrez, las más bellas melodías y los más pulidos teoremas matemáticos comparten todos este rasgo: poseer cada uno matices idiosincráticos que nos parecen lógicos *a posteriori,* pero que no es fácil prever. Tal vez una mente matemática estime que la habilidad ajedrecística, el arte melódico o la propia habilidad matemática sean formalizables, pero la verdad resulta ser mucho más compleja y desconcertante; hay que tomar en consideración un número excesivo de sutiles equilibrios.

Y considero yo que otro tanto sucede con las deformaciones de parquets. Cada una es, tomada aisladamente, fuertemente matematizable. Empero, to-



13. "Desbrozando la maleza"

madas como clase no son matemáticas. He aquí lo engañoso de ellas. No se deje confundir por la naturaleza aparentemente matemática de una deformación *individual;* la arquitectura de un programa capaz de crear todas estas deformaciones más otras igualmente buenas tendría que contener versiones computarizadas de *conceptos* y ser capaz de *enjuiciamientos,* nociones mucho más escurridizas y complejas que los meros números.

En este punto, muchos críticos de las ciencias de cómputo y de la inteligencia artificial, en su ansia de hallar algo "que los ordenadores no puedan hacer", suelen ir demasiado lejos: se avalanzan a concluir que el arte, la creatividad, son fundamentalmente no computarizables. ¡Mal podría ser ésta la conclusión a extraer! La conclusión a sacar es que, si ha de capacitarse a los ordenadores para actuar como los humanos, tendremos que esperar a disponer de modelos de ordenador provistos de características humanas tales como percepción, memoria, capacidad de creación de conceptos y de su organización en categorías, capaces de aprender, etcétera. Nos encontramos muy lejos todavía. Mas no hay razón para considerar *a priori* que tales metas sean inalcanzables, si bien deberán permanecer lejanas mucho tiempo.

He estado en este artículo jugando con la doble significación del término "arquitectura", que denota tanto el diseño de hábitats como la esencia abstracta de una gran estructura de tipo cualquiera. Por la primera acepción se emparenta arquitectura con el soporte físico (*hardware*), por la segunda, con el soporte lógico (*software*). En cierto sentido William Huff es profesor de ambas clases de arquitectura. Evidentemente, su preparación profesional fue para diseñar *hardware,* es decir, proyectar hábitats genuinamente humanos; Huff trabaja en una escuela donde eso es precisamente lo que se hace. Pero Huff está también comprometido en la empresa de imbuir en las mentes de sus alumnos una arquitectura de más blandos elementos: la arquitectura mental subyacente a la capacidad de crear belleza. Para fortuna suya, tiene asegurada, como punto de partida sobre el cual edificar, la complejidad de la mente humana.

Cuando conocí a Huff, al encontrarnos por primera vez y ver cuán abstractas y aparentemente carentes de utilidad eran las maravillosas obras producidas por su estudio de diseño —que van desde deformaciones de parquets, pasando por extrañas formas de rebanar un cubo, hasta estudios estructuralistas que se valen de miles de puntos para crear pautas cromáticas capaces de marear la vista —lo primero que me pregunté fue por qué este hombre era profesor de arquitectura. Pero tras conversar con él y con sus colegas se ampliaron mis horizontes acerca de la naturaleza de su disciplina.

El arquitecto Louis Kahn sentía gran respeto por la obra de William Huff; sean sus palabras las que sirvan para concluir:
"Lo que Huff enseña no es meramente lo que él ha aprendido de otros, sino lo que ha extraído de su talento natural, más la convicción de su veracidad y valor. A mi juicio, lo que imparte es la introducción a la disciplina subyacente al ritmo y la forma, la cual toca con las artes de la vista, las artes del sonido y las artes de la estructura. Enseña a los estudiantes de diseño a buscar lo abstracto, no lo representativo. Lo que es bueno de recordar por instructores/proyectistas (como es mi caso) y es particularmente bueno para los alumnos de cursos de proyecto, quienes carecen de la información básica suficiente. Es la introducción a exactitudes de este tipo la que infunde e inculca la religión del ordenado sendero".

Taller y laboratorio

Mecánica de las carambolas corridas, los retrocesos y massés (en juegos de billar)

Jearl Walker

El billar, en todas sus variantes, rezuma física por sus cuatro costados. Las bolas chocan entre sí y con las bandas cual moléculas de un gas encerrado en una suerte de recinto bidimensional. Pero la física penetra en el juego de un modo más sutil. El jugador experto sabe comunicar un giro interno a la bola y lograr con ello carambolas corridas, retrocesos y massés. La interacción entre el taco y la bola constituye quizás uno de los casos prácticos más estimulantes de la mecánica clásica. Para dominar las fuerzas y las trayectorias en este tipo de juegos es necesario practicarlos a menudo y con sentido analítico. Y, desde luego, una ventaja muy útil en el camino hacia ese objetivo es conocer la física subyacente.

Todd King, de Temple City, California, me acaba de remitir un estudio suyo sobre algunos de los golpes y jugadas clásicas del billar americano. Hasta hace pocos años entre lo poco escrito sobre la dinámica del billar sólo merecían la pena unos apuntes de clase de Arnold Sommerfeld, mucho más conocido por sus investigaciones en los albores de la nueva teoría cuántica. David F. Griffing, de la Universidad de Miami, dedica a los juegos de billar un capítulo de su libro *The Dynamics of Sports: Why That's the Way the Ball Bounces* (1982). Estas son las tres fuentes de información de las que me he valido para preparar la sección de este mes, acerca de la física de dichos juegos. Tras describir algunas relaciones sencillas examinaremos algunos golpes acrobáticos que Robert Byrne examina en su *Byrne's Treasury of Trick Shots in Pool and Billiards.*

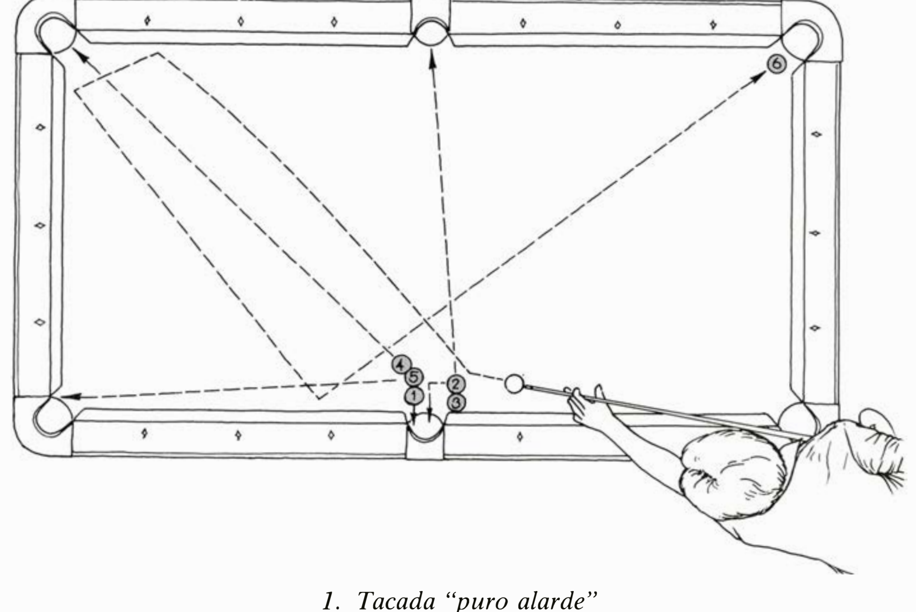
Cuando el taco pica la bola blanca, comunica a ésta un movimiento tanto de traslación como de rotación. Para simplificar, supondremos que el taco está horizontal y que ejerce una fuerza exclusivamente horizontal. Aunque ésta puede aplicarse en cualquier punto de la superficie de la bola enfrentada al jugador, lo cierto es que el golpe le induce un movimiento horizontal como si la fuerza se hubiera aplicado en el centro de masa.

Supongamos ahora que el impacto del taco se produzca en un plano vertical que pase por el centro de masa de la bola o, lo que es igual, en una línea vertical que imaginamos contenida en la superficie de la bola encarada al jugador y que pase por el centro de ésta. La ubicación de la tacada dentro de esa línea no guarda una relación directa con la velocidad inicial de la bola, ni con su cantidad de movimiento (producto de su masa por su velocidad). Estas las establecen otros dos factores relacionados con el choque. Uno de ellos, sobre el cual el jugador no ejerce prácticamente control alguno, es la duración. El segundo, que el jugador controla fácilmente, es la fuerza ejercida sobre la bola. Así, un golpe "fuerte" generará una velocidad y una cantidad de movimiento mayores que otro "blando", porque la fuerza que se desarrolla en la colisión es mayor.

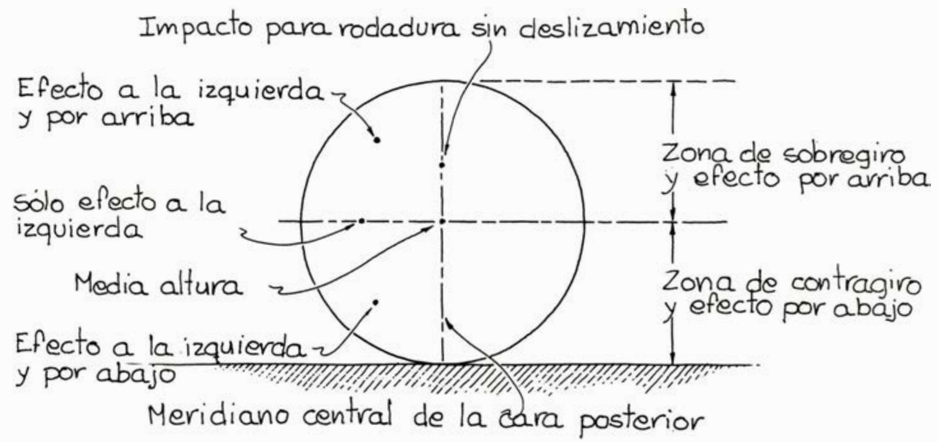
Además del movimiento horizontal, el taco genera un momento de giro que obliga a la bola a rotar alrededor de su centro de masa. El valor de ese momento de giro es igual al producto de la fuerza por su brazo de palanca, o distancia vertical entre el centro de la bola y el punto de incidencia del taco. El momento de giro aumenta, pues, cuando aumenta dicha distancia.

El momento de giro determina la velocidad inicial con que gira la bola alrededor de su centro de masa. La velocidad de rotación es proporcional al momento de giro dividido por el momento de inercia de la bola (número que da cuenta no sólo de la masa de un objeto, sino también de la distribución de la misma en torno al eje de rotación). Para una bola blanca que rote alrededor de un eje que pase por su centro de masa, el momento de inercia vale dos quintos del producto de su masa por su radio al cuadrado. Ese factor de 2/5, que se debe a su forma esférica, desempeña un papel relevante en las decisiones que toma el jugador acerca de dónde picarla en ciertas jugadas.

Si el jugador desea que la bola no tenga inicialmente giro interno, deberá picar a la altura del centro de masa, pues para esa tacada el brazo de palanca es nulo y, por tanto, lo serán también el momento de giro y la rotación. Golpeando más alto, en el choque habrá brazo de palanca y, por ello, un momento de giro no nulo. Entonces, la bola se moverá hacia delante en virtud del impacto, y rotará en torno a su centro de masa en virtud del momento de giro. De ese modo, la bola tiene sobregiro: su parte superior se mueve alejándose del jugador a mayor velocidad que si no llevara inducido ese efecto. Picando la bola por debajo del centro, se consigue contragiro.



1. Tacada "puro alarde"



2. Puntos estratégicos para picar la bola blanca

Con su golpe, el jugador controla, pues, tres características del movimiento: la fuerza determina la velocidad de la bola respecto a la mesa, el brazo de palanca de la fuerza determina el sentido de la rotación, y el producto de la fuerza por el brazo de palanca determina la velocidad de rotación.

Sin el rozamiento con la superficie de la mesa, la bola blanca seguiría moviéndose hasta chocar con una banda u otra bola. Pero si la bola se desliza por el paño, hasta una superficie alisada por el desgaste del juego puede ofrecer un rozamiento importante. El rozamiento puede ser suficientemente intenso para alterar, a la vez, los movimientos horizontal y de rotación y, por ello, hacer que la jugada varíe sustancialmente. Si la bola rueda sobre la mesa sin resbalar, el rozamiento es pequeño y afecta a poco más que al desplazamiento máximo.

El rozamiento que ha de vencer una bola deslizante depende del peso de ésta y la textura superficial de la misma y del paño, pero es independiente de la velocidad a la que resbala la bola. El sentido de la fuerza depende totalmente del sentido del deslizamiento. Supongamos que el jugador hiera la bola blanca dándole un gran efecto de sobregiro: entonces, el fondo de ella deslizará acercándose a él y se alejará el centro de masa. La fuerza de rozamiento está aplicada en el punto de contacto y su sentido es siempre tal que se opone al resbalamiento. (O sea, la fuerza, en este caso, apuntará en sentido contrario al billarista.) Como el rozamiento se opone al resbalamiento, comenzará a disminuir la rotación de la bola en torno a su centro de masa. Y como la fuerza de rozamiento apunta en sentido opuesto al jugador, continuará propulsando la bola hacia adelante y alejándola de éste. Toda bola con un gran sobregiro puede correr durante un buen rato merced a esa propulsión suplementaria.

3. Factores que definen un golpe con sobregiro

Supongamos que la bola reciba un contragiro. Entonces la fuerza impulsa la bola hacia adelante y el momento de giro hace que rote de suerte que el fondo resbale sobre el paño en el mismo sentido. En este caso, la fuerza de rozamiento actuante sobre la parte inferior de la bola apuntará hacia el jugador. Aquí, el rozamiento tenderá también a decelerar la rotación, pero esta vez su efecto sobre el centro de masa es hacia atrás. A medida que resbala la bola, se aminoran su movimiento hacia adelante y su giro. Desaparece el contragiro y la bola comienza a rodar sin deslizar. Toda bola con contragiro recorre sólo una corta distancia, porque el rozamiento se opone al movimiento de su centro de masa.

Toda bola con sobregiro desliza, a menos que la velocidad de su centro de masa sea igual a la velocidad de rotación multiplicada por el radio. Entonces, el movimiento hacia adelante se iguala exactamente al movimiento de su superficie inferior en el punto de contacto con la mesa. Para conseguirlo instantáneamente, el jugador debe picarla en un punto que esté, por encima del centro, exactamente a una distancia igual a dos quintos del radio. Esta relación la establece el hecho de que los 2/5 de la expresión matemática del momento de inercia y los 2/5 que figurarán en la expresión del brazo de palanca del momento de giro se cancelarán mutuamente.

Si la bola recibe el impacto por encima de ese punto particular, la velocidad de rotación empieza siendo demasiado grande para que se dé tal igualación, pero el rozamiento favorecerá que la bola llegue a ese estado. El rozamiento (apuntado hacia adelante) reduce la rotación y acrecienta la velocidad del centro de masa. Y si la bola no topa con nada, acaba alcanzándose la igualación de velocidades y comenzará a rodar sin deslizar.

Si recibe el impacto entre el centro y el punto en cuestión, su rotación tendrá el sentido correspondiente al de rodadura pura, pero será demasiado lenta. En el punto de contacto con el paño la superficie de la bola sufrirá un leve movimiento hacia atrás, a causa de su rotación, y un movimiento hacia adelante, más rápido, debido a la velocidad del centro de masa. En ese punto, el movimiento de deslizamiento neto será hacia adelante y, por ello, se generará una fuerza de rozamiento dirigida hacia atrás que tenderá a aumentar la rotación y a aminorar el movimiento del centro de masa, hasta llegar a la igualación de velocidades que produce una rodadura pura.

Si la bola recibe el impacto por debajo de su centro, el sentido del giro será el contrario al de la rodadura pura. Esta vez, el rozamiento producido por el resbalamiento reducirá tanto la rotación como la velocidad del centro de masa. La rotación terminará por cesar y la bola se arrancará a rodar sin deslizamiento.

Un buen billarista comunicará a la bola un recorrido largo o corto según esté situado el punto donde la pique con relación al punto particular. Si su deseo es que la bola llegue rápidamente al lado opuesto de la mesa, dará la tacada por encima de este último para que el rozamiento la impulse.

Pero es probable que al jugador le preocupe más el modo en que la bola blanca (la "bola" enfrentada al billarista) gire al chocar con otra. (Las otras bolas se llaman mingos.) En toda colisión entre una bola blanca y un mingo, la primera traspasa cantidad de movimiento a éste. En un choque frontal esa cesión es total y el centro de masa de la bola blanca se queda sin movimiento. En un choque de refilón la bola blanca pierde parte de su cantidad de movimiento y sigue su trayecto. En ningún choque hay prácticamente traspaso de rotación, pues el rozamiento entre las

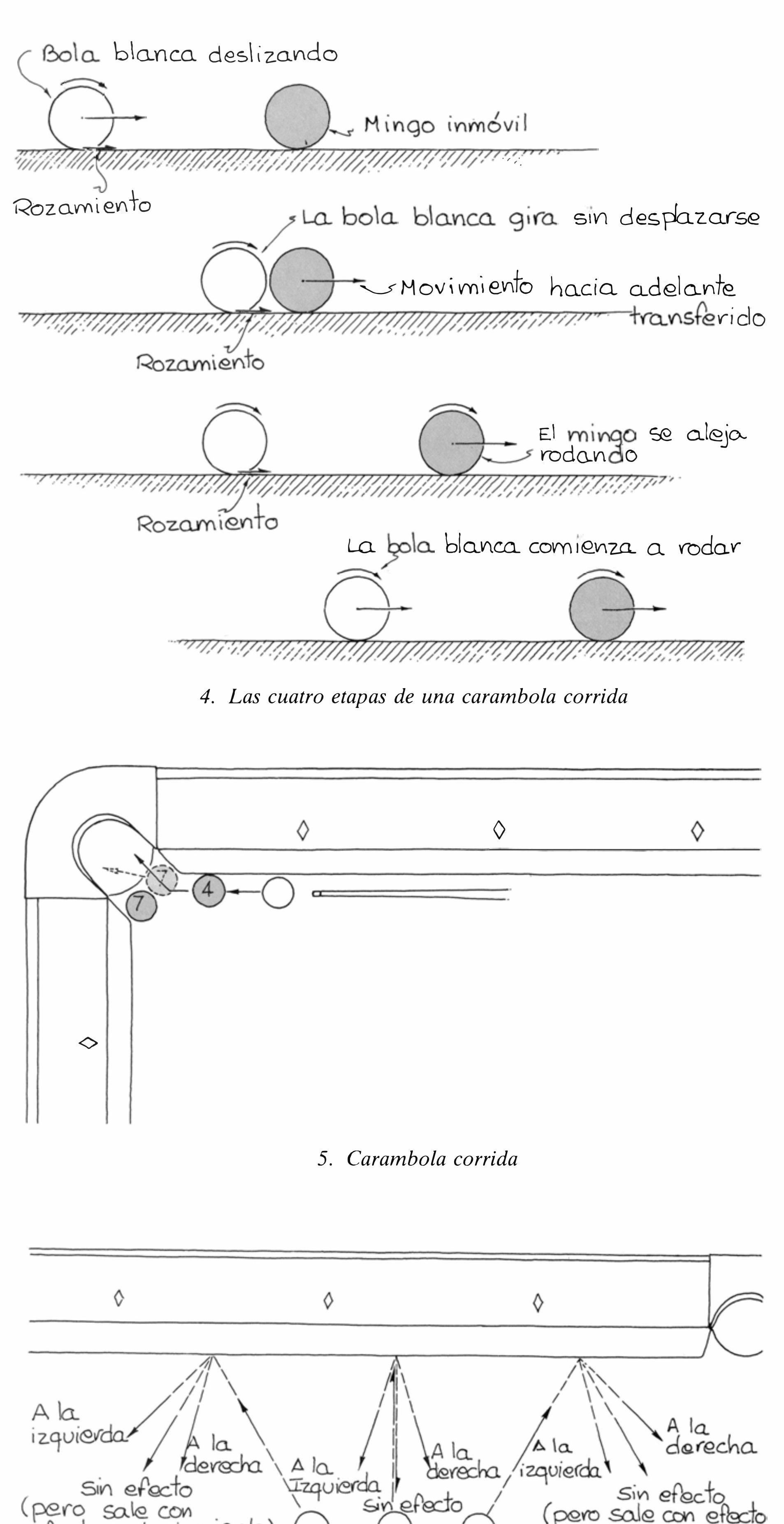
superficies de las bolas es insignificante y la colisión es breve. Sólo si el rozamiento fuese importante podría la bola blanca comunicar rotación a un mingo.

Esta imposibilidad de que una bola ceda rotación a otra resulta en dos jugadas muy interesantes. Supongamos que una bola blanca con sobregiro choque frontalmente con un mingo mientras esté aún resbalando. Inmediatamente después de la colisión, el centro de masa de la bola blanca carece de movimiento, pero la bola continúa girando. Entonces, ese giro engendrará una fuerza de rozamiento dirigida hacia adelante; hará éste que la rotación aminore y comenzará a impulsar a la bola, que no tardará en rodar nuevamente en pos del mingo. Esto es lo que se llama un golpe corrido. De una bola blanca con sobregiro suele decirse que está "corrida" o que lleva "efecto por arriba".

Si la bola blanca ha recibido un contragiro, retornará hacia el jugador tras golpear frontalmente a un mingo. Aquí la colisión la deja sin movimiento en su centro de masa, pero con la misma rotación; el rozamiento que se genera en la superficie deslizante apunta hacia el jugador. Entonces, a medida que el rozamiento retarde la rotación e impulse al centro de masa, la bola comenzará a rodar sin resbalar hacia el jugador. Esto es lo que se llama un golpe con retroceso. De una blanca con contragiro suele decirse que tiene "retroceso" o que lleva "efecto por abajo".

En la figura 5 se representa una carambola corrida. Un jugador desea meter en la tronera, de una sola tacada, las bolas cuatro y siete, para lo cual pica con efecto por arriba la bola blanca; lo que provoca que la bola cuatro rebote en la siete y entre en la tronera. El choque de la bola blanca con la cuatro deja a aquélla girando momentáneamente sin moverse del sitio, pero el rozamiento de deslizamiento no tarda en volver a impulsarla hacia la tronera. En el ínterin, la bola siete ha rebotado en la banda junto a la tronera, alineándose con ésta y la bola blanca. Esta la introduce en la tronera y se detiene.

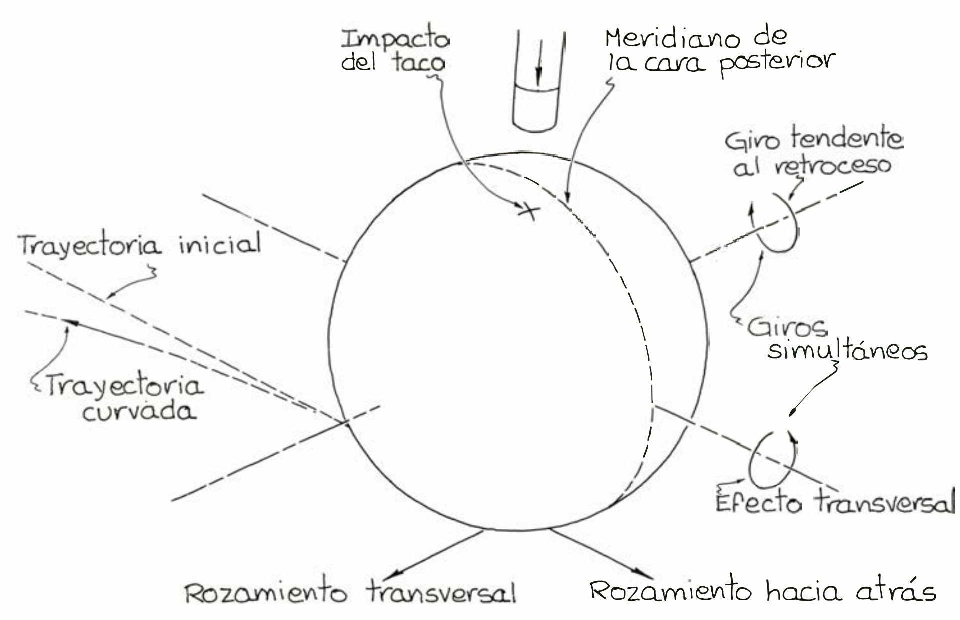
Hasta aquí hemos hablado únicamente de lo que pasa cuando se pica la bola blanca con el taco en un plano vertical que pase por su centro. El resultado de ello es un sobregiro o un contragiro alrededor de un eje horizontal. Pero si la bola se hiere en otro lugar, el eje de giro seguirá pasando por el centro de masa, pero ya no será horizontal. De un golpe en el costado izquierdo de la bola se dice que comunica efecto a la izquierda, y en el costado derecho,



4. *Las cuatro etapas de una carambola corrida*

5. *Carambola corrida*

6. *Resultados de dar efecto a la bola blanca*

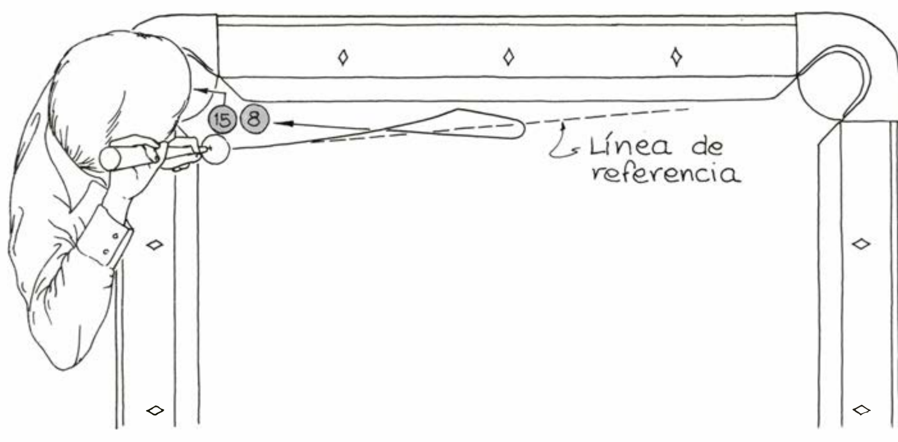


7. Factores que definen un massé

efecto a la derecha. Visto desde arriba un efecto a la izquierda es un giro en torno a la vertical en el sentido del movimiento de las agujas del reloj. Como antes, la velocidad de rotación depende del brazo de palanca asociado a la fuerza. Cuanto más lejos del centro la bola reciba la tacada, mayor será el brazo de palanca y, más rápido, el giro alrededor de la vertical. El rozamiento de la bola con la mesa sirve únicamente para disminuir la rotación.

Si el taco golpea en la parte superior o inferior de un costado, la bola girará en torno a un eje orientado entre la horizontal y la vertical. Una tacada por debajo del centro y a la izquierda produce un efecto de retroceso a la izquierda. El centro de masa recibirá una cantidad de movimiento del modo habitual y la bola rotará alrededor de un eje desviado del vertical hacia la izquierda del jugador. Esta rotación podemos imaginarla como si estuviera compuesta de dos giros simultáneos, uno horario en torno a la vertical y un contragiro en torno a la horizontal. A éste se debe la fuerza de rozamiento principal que actúa sobre la bola.

Una bola con efecto de costado se traslada en línea recta lo mismo que otra sin efecto, pero el ángulo bajo el que rebota en las bandas es notablemente distinto. Cuando la bola carece de efecto inicial, su ángulo de rebote es igual a su ángulo de incidencia sobre la banda. Si la incidencia es perpendicular, tal como se muestra en la figura 6, la bola debe recorrer de nuevo la misma trayectoria al rebotar. Pero si lleva efecto a la izquierda, seguirá un camino de retorno situado a la izquierda del jugador a causa del rozamiento producido durante el contacto con la banda. Vista desde arriba, una bola con efecto a la izquierda gira en sentido horario y, al resbalar contra la banda, la fuerza de rozamiento apunta a la izquierda. Entonces, cuando rebote, tendrá, además de la componente de velocidad perpendicular a la banda, una componente dirigida hacia la izquierda; y regresa por un trayecto que resulta de la combinación de esos dos movimientos.



8. Massé

Del mismo modo se rectifica la trayectoria de toda bola con efecto a la izquierda que se acerque a la banda bajo cualquier otro ángulo.

Los resultados contrarios se dan para un bola con efecto a la derecha. A fin de recordar de una forma sencilla la diferencia, basta con asociar la dirección del efecto con la desviación de la trayectoria de rebote: efecto a la izquierda se traduce en una desviación en sentido horario de la trayectoría y efecto a la derecha origina una desviación antihoraria.

Si la bola se acerca a una banda sin efecto, pero con un ángulo distinto de 90 grados, el rozamiento con esa banda le proporciona efecto. Consideremos la trayectoria de aproximación de la bola como si fuera la combinación de dos movimientos, uno perpendicular a la banda y el otro paralelo a ésta. Establecido el contacto, la componente paralela genera una fuerza de rozamiento sobre la bola, cuyo momento de giro consiguiente la induce a rodar y le comunica efecto. Supongamos que se lance una bola sobre la banda desde la derecha del jugador. Si careciese de giro interno inicial, abandonaría la banda con efecto a la izquierda.

Todas estas rotaciones lo son en torno a ejes contenidos en un plano perpendicular a la dirección del movimiento de la bola. El golpe massé, o massé a secas, produce un giro en torno a un eje exterior a dicho plano. Con el taco casi vertical, el billarista pica la bola de costado y hacia abajo. La componente horizontal de la tacada determina la trayectoria inicial de la bola, pero el giro interno que ésta recibe genera un rozamiento con la mesa que acaba curvando su camino.

Supongamos que el jugador pique la bola fuertemente de costado. Como el golpe es enérgico y el brazo de palanca grande, la rotación de la bola será rápida. Ese giro será en torno a un eje aproximadamente horizontal, pero no perpendicular a la trayectoria inicial de la bola. Para simplificarlo podemos imaginarlo compuesto de dos giros simultáneos alrededor de ejes diferentes, uno de ellos paralelo a la trayectoria inicial y otro perpendicular a ella. El giro en torno al eje perpendicular a la trayectoria inicial es similar al de un golpe con retroceso simple. El giro en torno al otro eje obliga a la bola a deslizarse perpendicularmente a la trayectoria inicial, engendrando así una fuerza de rozamiento que es también perpendicular a la trayectoria. Esta fuerza ejercida al través curva la trayectoria de la bola.

El massé se emplea corrientemente

para conseguir que la bola blanca rodee un obstáculo para alcanzar una bola desenfilada. En la figura 8 se representa un golpe massé más complicado. La intención es introducir las bolas quince y ocho de una sola tacada y que la ocho entre última en la tronera. Para ello se pica con massé la blanca, ésta golpea la bola quince, evita la ocho y se dirige hacia la banda siguiendo un camino curvo a causa del rozamiento transversal. Tras rebotar en la banda se detiene e invierte su movimiento, retrocediendo para arrojar la bola ocho en la tronera.

El impacto inicial sobre la bola blanca le comunica a la vez un contragiro, que genera una fuerza de rozamiento como la de un golpe con retroceso clásico, y un giro sesgado, que genera una fuerza de rozamiento transversal que curva su trayectoria en dirección a la banda. Al rebote en ésta le afecta poco el contragiro, pero el rozamiento transversal mantiene la bola junto a ella. Después del rebote el contragiro detiene por último el movimiento horizontal del centro de masa. Y, entonces, como la bola aún gira, aquella fuerza de rozamiento la hace regresar hacia el jugador; y el rozamiento transversal restante sigue impulsándola hacia la banda. Por consiguiente, tras la inversión de trayectoria, resultante de la componente de retroceso del golpe, la bola regresa a las cercanías de la banda para golpear la bola ocho e introducirla en la tronera de la esquina.

Cuando una bola blanca choca con un mingo, aquella traspasa a éste parte de la cantidad de movimiento y de la energía cinética de su centro de masa, cesión que es casi total si el choque es de frente. En un choque de refilón dichas transferencias hacen que ambas bolas se separen siguiendo trayectorias aproximadamente perpendiculares. (En la realidad, las bolas pierden una pequeña cantidad de energía en el choque, y el ángulo que forman sus trayectorias es un poquito menor que 90 grados. Pasaré por alto esta complicación.)

Es fácil predecir dónde irán a parar, tras el choque, la bola blanca y el mingo. Imaginemos el instante en que las dos bolas se tocan y tracemos una recta imaginaria que una sus centros. En ese instante el mingo recibe la acción de dos fuerzas por parte de la bola blanca. En el punto de contacto y perpendicularmente a la recta de unión de los centros hay una pequeña fuerza de rozamiento, casi siempre tan pequeña que puede despreciarse. Paralelamente a la recta hay una fuerza más intensa que impulsa el mingo a lo largo de una trayectoria paralela también a la recta. La dirección que tomará esta bola depende casi por completo de la orientación de la recta que une los centros de las bolas en el momento del contacto. Con su experiencia, un buen billarista puede dirigir la bola blanca para que entre en contacto exactamente del modo necesario para enviar un mingo a una tronera, y estar seguro de que saldrá en dirección perpendicular a aquella trayectoria.

Si la bola blanca lleva efecto por arriba o por abajo y, además, conserva el resbalamiento asociado cuando alcance al mingo, el choque variará algo en el sentido de que la bola saldrá del punto de colisión describiendo una trayectoria curva. Supongamos que haya recibido un gran efecto por arriba. En el choque cederá parte de la cantidad de movimiento y de la energía cinética de su centro de masa. Si podemos ignorar totalmente el rozamiento en la colisión entre ambas bolas, la blanca no traspasará al mingo parte alguna de su giro interno. Luego comenzará a alejarse del punto de colisión siguiendo una trayectoria perpendicular a la del mingo, y todavía con sobregiro. Lo curioso es que la bola ya no resbala paralelamente a su trayectoria y la componente del resbalamiento perpendicular a ésta da una fuerza de rozamiento que curva dicha trayectoria. Por tanto, una bola con efecto por arriba tiende a curvarse hacia su dirección original después de un choque. Una bola con retroceso tiende a curvarse alejándose de su trayectoria original.

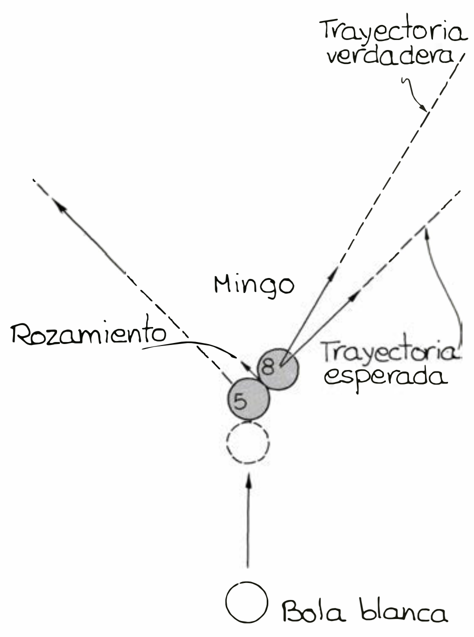
Normalmente el rozamiento entre dos bolas que chocan es despreciable. Pero puede incrementarse enormemente si las superficies se cubren de yeso. El ejemplo que he elegido procede del libro de Byrne. En la figura 11 se representa la cuestión: el jugador debe introducir la bola cinco en la tronera de la derecha. ¿Puede hacerlo sin que la bola blanca toque a la bola moteada (bola pinta)? En la mayoría de los casos esa jugada sería imposible. La bola cinco sólo puede ir hacia la tronera si el jugador alinea el choque de modo que la recta que una los centros de ésta y de la bola apunte hacia el agujero. Es evidente que la bola pinta se interfiere.

Esa jugada puede hacerse si el jugador enyesa el costado izquierdo de la bola cinco y luego envía la bola blanca sobre ese costado con un leve efecto a la derecha. Con yeso en la zona de contacto el rozamiento entre las bolas deja de ser despreciable. Ahora la bola cinco estará sometida a dos fuerzas durante el choque, una paralela a la recta de unión de los centros y otra (de rozamiento) perpendicular a dicha recta. Así, esa bola saldrá en la dirección de la resultante de tales fuerzas, precisamente el camino de la tronera.

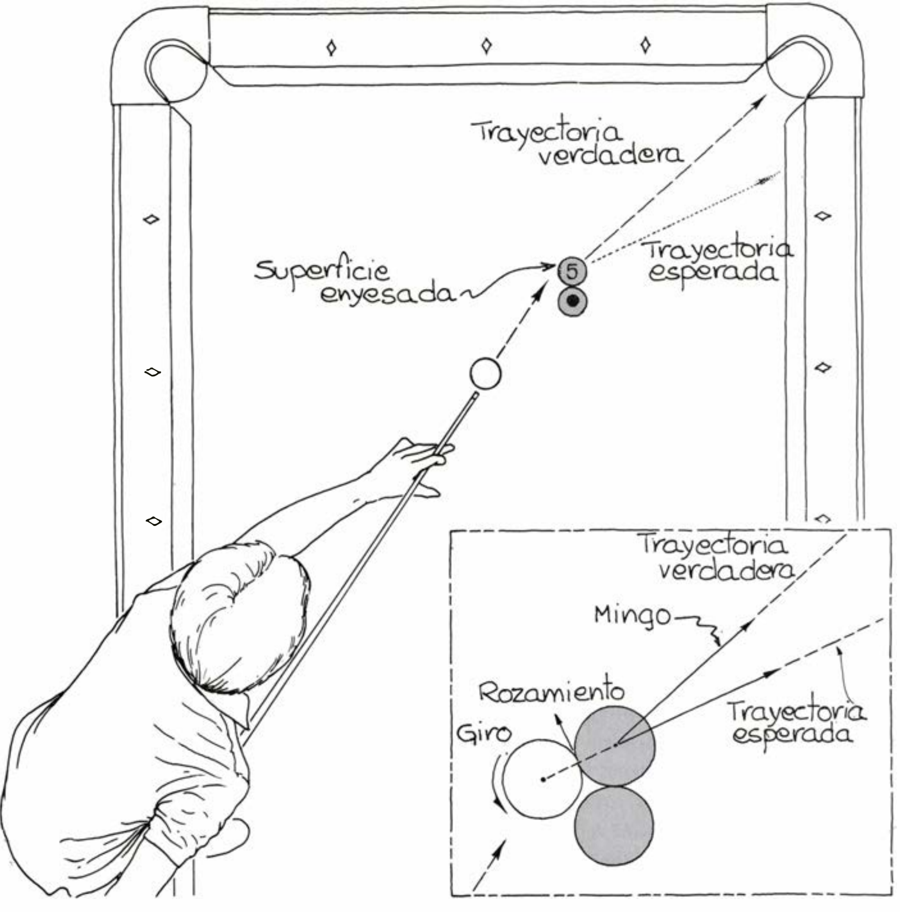


9. Choque de una bola blanca con un mingo

Enyesar una bola supone la expulsión segura de una partida de billar, pero se puede lograr, sin malas artes, una aplicación similar del rozamiento entre bolas. Cuando una bola blanca golpea un mingo que ya está tocando a otro mingo (de estos dos mingos se dice que están enganchados), la colisión crea un rozamiento entre estos dos que puede alterar, de manera importante, la trayectoria de uno de ellos. Consideremos la situación que se ilustra en la figura 10: la bola blanca se lanza directa-



10. Choque de una bola blanca con dos mingos enganchados



11. Rozamiento entre dos mingos

mente contra la bola cinco, pegada a la ocho.

Lo mejor será que analicemos la colisión en dos etapas. Primero la bola blanca cede energía y cantidad de movimiento a la bola cinco, que choca entonces con la ocho. Estas últimas deberían separarse a lo largo de trayectorias perpendiculares, pero, a causa del rozamiento entre los dos mingos, la bola ocho acaba saliendo en una dirección menos inclinada.

Durante la colisión entre las bolas cinco y ocho, la primera comienza a moverse en sentido perpendicular a la recta de unión de los centros. La ocho debe moverse paralelamente a esa recta en vista de la fuerza que, en el choque, le comunica la cinco. Ahora bien, al estar ambas inicialmente enganchadas, la cinco, en su movimiento, roza la superficie de la ocho, generando una fuerza de rozamiento perpendicular a la trayectoria esperada. Entonces, la trayectoria resulta ser consecuencia de la combinación de esas dos fuerzas y, por ello, está más orientada hacia adelante que si las bolas no estuvieran inicialmente enganchadas.

Vayamos con el último ejemplo: la tacada "de puro alarde". En torno a una tronera lateral hay cinco bolas agrupadas mientras la bola seis se encuentra en la embocadura de una tronera de rincón. ¿Entrarán todas de una sola tacada? No lo esperen, desde luego, de mí; pero se dice que Steve Mizerak, maestro del billar americano, lo consigue tres veces de cada cuatro.

Se envía la bola blanca hacia la dos con efecto por arriba y a la izquierda. Imaginemos la posición de las bolas y las fuerzas que median entre ellas en el instante en que la blanca llega a la dos. Sobre ésta última actúan tres fuerzas: una a lo largo de la recta de unión de su centro con el de la bola blanca, otra sobre la recta de unión de los centros de las bolas dos y tres, y como estas bolas estaban inicialmente enganchadas, sobre la dos actúa una fuerza de rozamiento dirigida a la derecha, aplicada en el punto de contacto, y que aparece cuando desliza con la tres. La fuerza neta sobre esta bola dos la envía contra la cinco, en la que rebota para entrar en la tronera.

Mientras tanto, la bola tres ha estado moviéndose. Cuando la bola blanca incide en la dos, ésta recibe dos fuerzas de la bola tres. Una de ellas, sobre la recta de unión de sus centros, la proyecta fuertemente contra la banda. La otra, de rozamiento y dirigida a la izquierda, se debe a la suave colisión entre ambas cuando la dos parte hacia la izquierda. (Esa fuerza de rozamiento se genera porque las bolas dos y tres estaban inicialmente enganchadas.) La banda devuelve la bola tres, lanzándola en lína recta al otro lado de la mesa, pero desviada hacia la izquierda a causa de su corto rozamiento con la bola dos. Y, así, la bola tres acaba en la tronera central opuesta.

La bola cinco estaba inicialmente enganchada a las bolas una y cuatro. Cuando la dos la golpea, se ve sometida a varias fuerzas. Una, dirigida sobre la recta que une su centro con el de la bola dos. Otras dos fuerzas yacen a lo laro de las rectas que unen su centro con los de las bolas una y cuatro, respectivamente. Y, además, sobre ella actúan las fuerzas de rozamiento ejercidas por su enganche a las otras. Entonces, la fuerza resultante sobre la bola cinco apunta claramente hacia la tronera del rincón izquierdo. La fuerza neta sobre la bola uno apunta hacia la tronera lateral contigua. La fuerza neta sobre la bola cuatro apunta hacia la tronera izquierda opuesta. Cinco bolas liquidadas.

Tras haberse desparramado esta agrupación de bolas, la blanca regresa al área. Esta bola había sido lanzada con efecto por arriba y a la izquierda. Su choque con la bola dos la deja en camino hacia la banda opuesta con la mayoría de su giro interno inicial, pero éste es, ahora, un poco transversal a la trayectoria. Por ello se curva hacia la izquierda, para rebotar más cerca de la tronera del rincón que si no existiera la fuerza transversal. Este rebote elimina la mayor parte del giro interno y, a partir de entonces, la bola blanca describe trayectorias rectas, rebotando dos veces más en las bandas. Por último, alcanza a la bola seis en el otro lado de la mesa y la introduce en la tronera.

Les he descrito sólo una limitada selección de jugadas. Quedan por estudiar millares muy interesantes. Quizá sea especialmente atractivo imaginar la mecánica de tacadas sobre grandes agrupamientos de bolas enganchadas. Byrne presenta varios casos curiosos ideados por maestros del siglo XIX. Revisten interés las tacadas con brinco, en las que la bola blanca se envía dando saltos por la mesa, y hasta de una mesa a otra. Pero seamos prudentes. Los propietarios de las salas de billar raramente son tolerantes con esas travesuras, ni siquiera en aras de la investigación científica.

Libros

Teoría de juegos, psicología cognoscitiva, ecología, cirujanos del siglo XVIII y quarks

R. Margalef, J. M. Tous, M. Alcaraz, A. Albarracín y A. Méndez

Evolution and the Theory of Games, por John Maynard Smith. Cambridge University Press, Cambridge, London; 224 páginas. La teoría de juegos puede ayudar a entender algunos aspectos del funcionamiento de la naturaleza. Un juego es un sistema de interacción que se desarrolla en el tiempo y entre diferentes participantes. Cada participante adopta, mantiene o modifica una determinada estrategia. La estrategia consiste en que, según sea la situación, se actúa o responde de determinada manera. Este libro es un compendio escrito con gran claridad sobre la aplicación de la teoría de juegos a ciertos aspectos de la evolución y resume, principalmente, contribuciones anteriores del mismo Maynard Smith, que hace una década, en colaboración con Price, introdujo el tema de una manera formal, desarrollando, a su vez, ideas que en buena parte habían sido presentadas unos años antes por Hamilton.

El libro está organizado en 14 breves capítulos, más varios apéndices que tratan especialmente de diversos aspectos matemáticos suscitados a lo largo del desarrollo del texto. El libro se lee bien y resulta convincente dentro de un dominio acotado con más lógica que imaginación. El juego de la evolución es comparable a ciertos juegos de cartas, en los que alrededor de la mesa se sientan personas que compiten en equipo. Los partenaires unidos en una alianza son comparables con los individuos de una especie que, por lo menos, están unidos en una alianza reproductiva; los distintos equipos participantes compiten como pueden hacerlo dos especies diferentes.

El tema principal del libro de Maynard Smith es cómo los individuos de una especie pueden desarrollar estrategias diferentes, pero de tal modo que la eficacia de la especie sea máxima, o por lo menos, tolerable. El ejemplo inicial, en otras presentaciones, y en ésta, es el de una especie en la que unos individuos se comportan agresivamente como "halcones" y los otros pacíficamente como "palomas". Con algunos supuestos razonables en relación con la adquisición y defensa de territorios y la capacidad de dejar descendientes, se llega a la conclusión de que una población que contenga los dos tipos de individuos puede resultar más adecuada para la supervivencia de la especie. De esta forma se arriba al concepto de "estrategia evolutivamente estable", que permite la supervivencia de una especie o aumenta su adecuación. Estas estrategias mixtas, con su posible evolución, se examinan principalmente en relación con los problemas de defensa del territorio y mayor o menor agresividad asociada con él, con la proporción sexual y diversas formas de comportamiento sexual.

Si el comportamiento tiene una base genética, una estrategia estable mixta presupone un polimorfismo genético estable, con frecuencias relativas de los distintos genotipos o morfos comporables a las frecuencias que caracterizan la estrategia evolutivamente estable. Hay que contar, por supuesto, con la variabilidad, cíclica o no, del entorno, en relación con la duración de la vida, que puede complicar el esquema. Cuando el comportamiento contiene una importante componente cultural, la definición y transmisión de las estrategias culturales adquiere relevancia, y se puede hablar de estrategias culturales estables.

La transmisión –u ocultación– de información es un elemento crucial en la interacción entre jugadores y lo es también en la evolución de poblaciones, principalmente de vertebrados. Este tema se aborda con la atención necesaria, así como también las estrategias mixtas basadas en un polimorfismo de tamaño, lo mismo que la evolución de los ciclos vitales.

Se trata, ciertamente, de un aspecto muy importante de la selección y de la evolución. Ciertos naturalistas han aceptado siempre, implícitamente, que la especie, como tal, podía salir beneficiada por una diferenciación, más o menos complementaria, en las estructuras y en el comportamiento de los distintos individuos. Puede ser constructivo debatir estos problemas dentro de un terreno más riguroso; pero no debemos olvidar que ciertos términos, como *payoff, fitness, trade of*, etcétera, no conservan su aparente solidez, si el análisis se lleva más allá. Si la vida es continua adquisición de información en un escenario cambiante, la estabilidad de una estrategia es relativa, y más bien se trataría de estabilizar la modalidad de evolucionar la estrategia. Aunque el tema del mutualismo entre especies se menciona brevemente, la coevolución de diferentes especies que ajustan unas con otras sus respectivas estrategias es tema tan ignorado como es costumbre en los textos modernos. (Pensemos en un parásito que induce en el hospedador un comportamiento que conduce a una mayor probabilidad en la dispersión del parásito y en la muerte o falta de reproducción de los hospedadores infectados.)

El libro hace pensar y abre perspectivas que merecen ser exploradas en relación con la evolución del hombre: ¿es cierto que la preferencia de un sexo por un carácter presente en los individuos del otro puede forzar la evolución? ¿de qué forma se insertan la anticoncepción y el aborto en una estrategia evolutivamente estable? y ¿hasta qué punto pueden difundirse abundamente elementos culturales parásitos, los memes, de que nos habla Dawkins en uno de sus libros? En fin, la obra de Maynard Smith encierra, bajo su apariencia un tanto ávida de rigor, que sólo puede desorientar a los más ingenuos, una gran riqueza de sugerencias entre líneas, verdaderamente enriquecedoras para cualquier concepción de la evolución biológica. (R. M.)

Psicología Cognitiva y Procesamiento de la Información, por Isidoro Delclaux y Julio Seoane, directores. Ediciones Pirámide, S. A., 1982; 254 pp. Consta de un índice de materias, prólogo de los directores, trece capítulos agrupados en tres partes y escritos por trece profesores, incluidos los directores del libro, e índice analítico. La bibliografía, muy numerosa, aparece al final de cada uno de los capítulos. La relación de autores por universidades es: Universidad Autónoma de Madrid, Juan Botella, Isidoro Delclaux, José M.ª Ruiz Vargas y José Luis Zacagnini;

Universidad de Barcelona, Jaime Arnau; Universidad Complutense de Madrid, José E. García-Albea y María del Rosario Martínez Arias; Universidad de Santiago de Compostela, Manuel de Vega Rodríguez; Universidad de Valencia, Amparo Belloch, Margarita Dijes, Adela Garzón, Elena Ibáñez y Julio Seoane. En el prólogo se hace constar explícitamente que "el presente volumen surge de una reunión científica celebrada en la Universidad Autónoma de Madrid, con la denominación de *La psicología bajo el punto de vista del procesamiento de la información*". Es evidente que una obra con tal cantidad de autores diferentes difícilmente puede comunicar los contenidos sin reiteraciones, como reconocen los mismos directores en el prólogo, y manifiestas contradicciones. Los capítulos no tienen un mismo nivel, ni los objetivos críticos son los mismos. Todos estos aspectos hacen que el presente libro se pueda considerar un documento vivo de la realidad psicológica de la década de los años setenta en España. La labor de lectura y traducción, muy por encima de la aparentemente nula investigación, se manifiesta en que, de las más de cuatrocientas citas del texto, sólo unas cuarenta corresponden a autores españoles, de éstas tan sólo ocho son de autores distintos de los que han redactado el libro, y todas ellas cabe considerarlas como puntualizaciones teóricas y no como informes de investigación en esta área.

La tesis que plantea el libro puede resumirse de la siguiente manera: la psicología cognitiva y el procesamiento de la información son dos denominaciones diferentes para una misma realidad, o sea, la psicología que aparece como alternativa de la psicología conductista y neoconductista. Esta psicología la definen como un estricto neomentalismo al considerarla centrada en el estudio de las estructuras y procesos mentales. La falta de validez ecológica de la misma, ya sea por limitaciones del método utilizado, ya sea por su marcado carácter formal, hace que pueda considerarse ya muerta.

A pesar de sustentar los autores de la obra una tesis tan pesimista como la que hemos mencionado, la ordenación de los diferentes capítulos en tres partes no corresponde al certificado de defunción de la misma; sino más bien a la aceptación implícita de que esta psicología es la que está realizándose en la actualidad. En la primera parte nos presentan los planteamientos teóricos, en la segunda se comentan los resultados de algunas investigaciones desde el punto de vista del enmarque teórico anterior y en la tercera se presentan algunas aplicaciones prácticas al ámbito clínico y psicopatológico. Punto y aparte merece el capítulo trece del libro, ya que en él observamos una posición menos rupturista con la psicología inmediatamente anterior, al admitir los nuevos procesos de control pero manteniendo los antiguos procesos seriales estímulo-respuesta (E-R), en un mismo modelo. Se esboza para el concepto de información su definición como incertidumbre. Los procesos están claramente diferenciados en dos: proceso de impresión (identificación del estímulo) y proceso de expresión (selección de respuesta). Se insinúa, incluso, que este planteamiento lleva inevitablemente a preguntarse por la relación entre la teoría de la detección de señales y el procesamiento de la información, ya que en aquélla nos encontramos también con los mismos procesos fundamentales: proceso de impresión (sensibilidad) y proceso de expresión (toma de decisión).

Presentar la psicología cognitiva como una vuelta a los orígenes, a los procesos mentales como los directores que ordenan la actividad o conducta del ser humano, sin considerar explíticitamente las aportaciones del conductismo y sobre todo del neoconductismo que son las que permiten formular esta proposición, representa dotar de significado añadido al mentalismo clásico y a la psicología del pensamiento, constatable con sólo volver a leer la obra de Edwin G. Boring y el trabajo de George Humphrey. El conocimiento cuando surge del trabajo científico es necesariamente acumulativo. Obscurecer esto es, por lo menos, dar entrada a la duda razonable de si es posible una psicología constituida por conocimientos y no tan sólo por saberes. La distinción entre una psicología basada en estímulos y respuestas, como el procesamiento de información, y una psicología basada exclusivamente en estímulos y respuestas, como el conductismo, no es tan grande a fin de cuentas. La consideración del hombre como buscador activo de estímulos la encontramos ya en Woodworth cuando desarrolla su modelo de la pulsión mediante un esquema prácticamente cibernético. La intencionalidad del sujeto aparece claramente desarrollada en la obra de Edward Ch. Tolman, de la que parten por lo menos implícitamente los psicólogos del aprendizaje social como Bandura y Phares. La simbolización de los estímulos del medio es explícitamente aceptada, no sólo por la psicóloga Donald O. Hebb, al presentar el sistema nervioso central como un sistema nervioso conceptual, sino también por F. Le Ny al comentar el estímulo condicional en la obra de Pavlov, que posteriormente ha sido analizado por Rescorla y Wagner, a partir de la distinción entre contigüidad y contingencia; aunque la proposición de que los organismos están interactuando con símbolos y no con meros estímulos del entorno la encontramos ya desarrollada en la hipótesis mediacional de Charles E. Osgood.

Dos fueron, a nuestro parecer, las causas que fomentaron estas posturas de rompimiento con la psicología inmediatamente anterior e incluso paralela al desarrollo del procesamiento de la información en psicología. Una, la precipitación del primer Neisser al titular su comentario a una serie de trabajos de investigación basados en el neoconductismo y en el procesamiento de la información, psicología cognitiva o cognoscitiva. Más prudentes resultaron, y quizá por ello no han tenido que rectificarse como el segundo Neisser, Lindsay y Norman mencionado en el libro que comentamos, Dominic W. Massaro y Dougals L. Hintzman que presentan –sobre todo el último– una solución de continuidad entre las aportaciones del neoconductismo y los actuales planteamientos del procesamiento de la información. Otra, la interpretación reduccionista y antropomórfica del concepto de información planteado en la teoría de la comunicación de Shannon y Weaver. Además, el libro se ve claramente influido por los psicólogos interesados en la inteligencia y el pensamiento, los cuales pensaron que el modelo de procesamiento de la información podría serles útil en la elaboración de una ciencia cognitiva, ante las limitaciones tanto del análisis factorial, como de la epistemología genética.

En la presente obra se define la psicología cognitiva como "el estudio de los procesos y estructuras mentales para poder entender mejor la conducta humana"; pero no aparece una delimitación explícita de procesamiento de la información. Intuitivamente puede aceptarse que la psicología cognitiva sea la especificación de la forma de procesar el ser humano; con todo queda sin especificar qué entienden los autores por información. Intuitivamente, también, podemos considerar que todos sabemos ya qué es la información. Los psicólogos cognoscitivos, en su mayoría, han dado por supuesto que la información es simple y llanamente un sinónimo de la comunicación y en especial de la comunicación humana. Fue

Miller uno de los primeros psicólogos que propuso una definición más amplia de la información que su acepción como mera comunicación humana, al definirla como "cualquier cosa que reduce la incertidumbre asociada con el estado del acontecimiento en cuestión". Posteriormente Mahoney se cuestiona el concepto de información dado por Miller; acepta: *1*, la información no es inherente al estímulo, sino una interacción entre éste y el que lo percibe; y *2*, la definición de información debe ser lo suficientemente amplia para abarcar la serie potencial de inputs de la conducta.

Una observación realizada por la socióloga Barry A. Turner pone de manifiesto que la información transmitida por los medios de comunicación social de un desastre, o sea, la comunicación verbal o escrita del mismo, produce inicialmente en los receptores un aumento de la incertidumbre, más que una reducción de la misma, tal como sería de esperar de la definición de información. Para aclarar esta contradicción Turner acude a la distinción realizada por C. Cherry entre canales de comunicación y canales de observación. La información que circula por los canales de comunicación se da en un sistema cerrado, mientras que la información presente en los canales de observación se da en un sistema abierto. Unicamente el sistema abierto, o sea la observación, permite la reducción de la incertidumbre, ya que en este caso la información anterior y la actual pueden ser acomodadas al establecer el observador nuevas categorías mediante las cuales reducir su incertidumbre. La información es, pues, el resultado del estar presente en el medio, más que el hecho de estarse comunicando, por lo que debemos plantearnos, al menos, tres tipos de información diferente para el ser humano: la información material, la información aprendida y la información virtual. Precisamente por ello la metáfora del ordenador no es generalizable a todo el procesamiento de información humano, ya que es necesario establecer otros análogos tanto fisiológicos como mecánicos para poder dar cuenta de cada una de estas clases de información.

Por último se puede plantear la historia de la psicología científica de estos últimos veinte años, al igual que los autores del libro, como una pugna entre teorías rivales por conseguir la hegemonía; o se puede considerar la evolución y desarrollo de la psicología en un continuo que tiende a desembocar en la naciente aparición de una psicología teórica. La psicología teórica no es una teoría psicológica más, sino una estructura teórica general constituida por constructos hipotéticos mecanicistas, fisiológicos y mentalísticos. La evidencia de este segundo planteamiento se manifiesta en el ataque no ya al conductismo o al neoconductismo, sino al llamado situacionismo por parte de los psicólogos interesados en las diferencias individuales. El procesamiento de la información tan sólo irrumpe en la psicología cuando ésta, gracias al neoconductismo, ha conseguido pasar de una teoría cajanegrista a una teoría representacional. El momento que Mariano Yela describía, en el último Congreso Nacional de Psicología de Santiago de Compostela, aunque de forma algo tardía, como aquél en el cual el guión entre el estímulo y la respuesta centraba toda la atención de los psicólogos. Cuando se trata de dar contenido a este guión es cuando aparecen las críticas y pseudocríticas de la validez ecológica de la psicología. Para los psicólogos neoconductistas y del procesamiento de la información no están en este guión ni la competencia de Chomsky, ni el componente de Robert J. Sternberg, sino conceptos teóricos o constructos hipotéticos anclados en unos antecedentes y consecuentes que siguen siendo E-R, capaces de describir y explicar la conducta como la funcionalidad propia de un estado, constituido por estructuras y funciones, y el cambio en la conducta como el paso de un estado a otro mediante un proceso. (J. M. T.)

ANATOMÍA Y CIRUGÍA ESPAÑOLA DEL SIGLO XVIII. (NOTAS Y ESTUDIOS), por Juan Riera. Acta Histórico-Médica Vallisoletana, XIII. Monografías. Universidad de Valladolid. Ediciones del Seminario de Historia de la Medicina; Valladolid, 1982; 254 páginas. La lectura de este librito del profesor Juan Riera, catedrático de historia de la medicina en la Facultad de Medicina de la Universidad de Valladolid, trae de inmediato a mi mente una frase de José Ortega y Gasset que aparece en el volumen VII de *El Espectador*, en un artículo titulado "El origen deportivo del Estado". Escribió allí nuestro filósofo que "la palabra que más sabor de vida tiene para mí y una de las más bonitas del diccionario es la palabra 'incitación'". Frente a la "causa", la incitación es la respuesta generosamente desproporcionada al impulso que la produce. Trataré más adelante de explicar el sentido de esta apelación a Ortega.

Es evidente que Juan Riera es uno de los mejores documentalistas de nuestra cirugía ilustrada. Recuérdese, en especial, sus libros *Los textos quirúrgicos españoles de la segunda mitad del siglo XVIII*, Salamanca 1968, y *Cirugía española ilustrada y su comunicación en Europa*, aparecido en esta misma serie vallisoletana como fascículo VII, el año 1976. Especialmente vocado a la investigación de archivo, tanto el de Simancas como el Histórico Nacional constituyen su habitual fuente documental.

El libro que ahora comento consta de una serie de pequeños trabajos, en su mayor parte dedicados a la cirugía madrileña del XVIII, acompañados de unas referencias a figuras menores de Cádiz y Sevilla y de un estudio, más amplio, que consagra a las cirugías valenciana y de Palma de Mallorca.

Importante contribución al conocimiento del desarrollo ilustrado en la cirugía madrileña son las noticias que nos ofrece acerca de "La creación del Colegio de Profesores Cirujanos de Madrid", institución de cuño moderno surgida en la Corte el año 1747 –un año antes de la erección del Real Colegio de Cirugía de Cádiz–, y que constituye un núcleo científico importante, vinculado a la corte borbónica y al Hospital General de Madrid. Se trata de un elenco de profesionales franceses y españoles, con ambición renovadora, que proyecta el cultivo sólido de la cirugía y la anatomía mediante la observación y la experiencia, y la promoción de su adelanto y perfección. Un apéndice documental que incluye el Privilegio de Protección Real de 16 de enero de 1748 y la esclarecedora pugna establecida entre el Colegio y la Cofradía de San Cosme y San Damián concluye esta breve aportación histórica.

De inmediato nos ofrece Riera "Los precedentes ilustrados del Real Colegio de Cirugía de San Carlos", fundado como es sabido en 1787. Destaca el autor, entre tales precedentes, el auge de los estudios de anatomía y cirugía en Madrid –objeto fundamental del trabajo–, la evolución de sus instituciones hospitalarias, especialmente del Hospital de la Corte y del General, la presencia de cirujanos extranjeros en Madrid, la protección y el favor reales y el estímulo que en su momento supuso la experiencia de los Reales Colegios de Cirugía de Cádiz y Barcelona. Otro apéndice documental relaciona los profesores de cirugía salidos de los Establecimientos radicados en los Reales Hospitales Generales de la Capital.

El tercer trabajo dedicado al tema permite ofrecer noticia de los médicos y cirujanos de la Corte –tal es su título: "Médicos y cirujanos de la Corte"–, especialmente de los de Cámara y de

aquellos que viajaron al extranjero desde Madrid. Un nuevo apéndice ofrece la lista de los galenos existentes en la ciudad el año 1773.

Puede, finalmente, englobarse en este apartado un nuevo trabajo, que en el librito aparece en penúltimo lugar, "Ramón Oromi y el método de las unciones", que nos narra el ensayo terapéutico efectuado por este médico en el Hospital General de Madrid el año 1768, relativo al tratamiento de la sífilis.

En un segundo grupo podemos englobar los trabajitos dedicados a figuras desconocidas de la medicina española ilustrada: "El cirujano dentista Pedro Seminara en España" –un italiano que a comienzos del siglo XIX se estableció en Cádiz– y "El oculista alemán José Hillmer en España" –el itinerante cirujano oftalmólogo que llegó un día a Sevilla y, acusado de intrusismo, hubo de vérselas con la Regia Sociedad de Medicina hispalense–.

Dos trabajos aportan datos sobre la cirugía valenciano-balear. Un amplio estudio de "La cirugía valenciana y el reformismo ilustrado", que nos informa sobre la precaria situación de la cirugía valenciana del XVIII, señalando entre otros motivos su falta de institucionalización, la introducción del Protomedicato en la Corona de Aragón, la desaparición del antiguo Colegio de Cirugía y, sobre todo y con mayor detalle, la pérdida de los fueros a escala de la administración pública por unión a la Corona de Castilla. Este último acontecimiento, expresado en el famoso Decreto de Nueva Planta de 29 de junio de 1707, fue origen de prolongados enfrentamientos entre el Protomedicato y el Colegio Gremial de Cirujanos de Valencia. Quizá la creación de un Colegio de Cirugía similar al gaditano, al catalán y al madrileño, hubiese permitido la elevación de esta cirugía: el proyecto y su falta de cristalización se narran en la parte final de este estudio.

"Nuevos datos sobre el Colegio de Cirugía de Mallorca" es ocación para que Riera ofrezca con algún detalle la figura de Francisco Puig, sus escritos quirúrgicos y su Plan de estudios de Cirugía.

Concluye el librito con un capítulo sugestivo y nostálgico: "Pedro Virgili y el Colegio de Farmacia. (Un proyecto de 1763)". Nos informa el autor de aquel proyecto fallido del cirujano catalán de un Colegio de Farmacia, Química y Botánica en Barcelona, que hubiese supuesto, indudablemente, una decidida novedad frente a la tradicional formación de los boticarios.

Iniciaba mi reflexión acerca de este libro de Juan Riera con un recuerdo a la "incitación" orteguiana. ¿Por qué ello? Pienso que las páginas del historiador de la medicina vallisoletano muestran palpablemente, y el propio autor lo confiesa en múltiples ocasiones, la manquedad de nuestros conocimientos actuales sobre amplias parcelas de la medicina española. Muy especialmente se subraya –y hablo en este momento como historiador médico afincado en Madrid– la falta de noticias sobre el referido Colegio de Profesores Cirujanos de Madrid; sobre sus relaciones con el Hospital General de la capital, un hospital que está requiriendo una urgente historia todavía no emprendida; sobre la medicina madrileña del siglo XVIII y, luego, sobre el Protomedicato ilustrado; sobre el Colegio de Cirugía de Mallorca, pese a los esfuerzos de Rodriguez Tejerina, de Bujosa y del propio Riera; sobre tantos temas más.

Quizás el mérito principal de esta colección de estudios documentales que nos ofrece Juan Riera estribe en ello: en que puedan servir de espuela aguijoneante que permita pronto respuestas "generosamente desproporcionadas" a las cuestiones oscuras, y un conocimiento sistemático y cabal de la medicina española del siglo XVIII, complemento exhaustivo de la ejemplar tarea hasta ahora llevada a cabo por el profesor Luis S. Granjel, con su Historia de la Medicina Española. (A. A.)

LOS QUARKS, LA MATERIA PRIMA DE NUESTRO UNIVERSO, por Harald Fritzsch, Alianza Universidad; Madrid, 1982. Cinco años atrás, un colega inglés me comentaba ciertas encuestas realizadas a estudiantes de escuelas secundarias de aquel país sobre sus preferencias vocacionales. Me sorprendió el hecho de que un 30 por ciento de los que se interesaban por la física manifestaban su deseo de trabajar en el tema de los quarks. Por supuesto, el conocimiento que aquellos estudiantes tenían sobre los quarks era muy superficial y probablemente rozaba la ciencia ficción. Pero lo que me llamó la atención fue que la palabra quark gozara de tan amplia difusión. Pensé que la misma encuesta realizada en colegios españoles habría dado resultados muy distintos. Ello me invita a reflexionar sobre el importante papel de la divulgación científica que, sin duda alguna, refleja el nivel y la tradición científica existente en un país.

El autor de esta obra, en la actualidad profesor de la Universidad de Munich, no sólo es un perfecto conocedor del tema sino que ha estado directa y activamente involucrado en el mismo. Ello confiere un estilo especial a la divulgación, que se enriquece del entusiasmo y los matices que acompañan al desarrollo de un tema por el que se tiene especial devoción. En este sentido, desde la primera línea de la introducción se hace énfasis en la curiosidad como principal motivación en la ciencia, y afirma el autor: "Creo que los resultados de esta investigación tienen en sí un valor cultural, igual que los tienen, por ejemplo, los cuadros de Rembrandt o las sonatas para piano de Beethoven. Como cualquier actividad realmente creadora, el estudio del mundo físico que nos rodea proporciona verdadera satisfacción y alegría". Matices que recoge la excelente traducción castellana del original alemán de Josep Antoni Grifols, profesor de la Universidad Autónoma de Barcelona y asimismo profundo conocedor del tema.

En la introducción despliega ante nosotros el mundo microscópico y los ingredientes teóricos básicos de su descripción: la teoría cuántica y la relatividad. El estudio del átomo se expone en el primer capítulo y sirve de base para ir ahondando en la teoría cuántica. Se detiene en el positronio, que será útil en la segunda mitad del libro, al compararlo con su análogo formado por quarks y estudiar así las "fuerzas de color".

El segundo capítulo se ocupa de la teoría unificada de la electricidad y el magnetismo, donde analiza el concepto de campo, tanto en su visión clásica como cuántica, ejemplo clásico además de unificación de dos interacciones, que volverá a ser objeto de consideración al final del libro cuando aborde la unificación de las interacciones débiles y electromagnéticas.

Se consideran luego las fuerzas nucleares y el mundo de las partículas elementales. Al final del cuarto capítulo aparecen los quarks como constituyentes de los hadrones. Su estudio, así como el de la "zoología" de las partículas elementales asociada, se expone en los capítulos quinto al octavo, donde se habla de la extrañeza, el encanto y, en general, de los tipos o "sabores" de quarks. Llegamos a la noción de "color", cuyo papel como carga fuerte se desarrollará pormenorizadamente: teoría de las interacciones fuertes basada en el color como fuente de las mismas (la cromodinámica cuántica), que se compara con la teoría de las interacciones electromagnéticas (la electrodinámica cuántica), y confirmaciones experimentales de dicha teoría.

Se ocupa, a continuación, de las interacciones débiles y su unificación con las electromagnéticas. Los dos últimos

capítulos constituyen un breve análisis de los problemas abiertos así como una exposición de los proyectos experimentales diseñados para confirmar o desechar algunas de las teorías actualmente aceptadas y discernir entre diversas soluciones de los problemas teóricos planteados.

No puede dejar de mencionarse un tema que, debido a la fecha de publicación del libro, no aparecen en el mismo. Se trata de la reciente detección experimental en el CERN de los bosones W y Z, mediadores de las fuerzas débiles, que constituye, sin duda, uno de los avances científicos más espectaculares de este siglo, al confirmar la unificación de las interacciones electrodébiles. Me hubiese gustado alguna alusión al tema de las supersimetrías en el capítulo 19 a propósito de la unificación de la gravitación con el resto de las interacciones.

He encontrado, en una primera lectura, algunas erratas de imprenta que en general se aclaran en el propio texto. Quisiera señalar tres de ellas que podrían confundir al lector poco conocedor del tema: en el penúltimo párrafo de la pág. 74 se definen los leptones como partículas que participan en las interacciones fuertes, cuando es exactamente lo contrario. En la segunda línea de la pág. 104 se asigna a la partícula Σ una extrañeza de -2, cuando en realidad se refiere a la partícula epsilon, como se aclara inmediatamente después. Finalmente, hay un error en la pág. 230 (que aparece también en el original alemán y que, sin duda, fue un lapsus del autor). Se trata de la frase "los átomos de Cobalto dextrógiros son ahora levógiros". Dicha frase debería suprimirse, puesto que al ser las direcciones de espín perpendiculares al plano del espejo (según se indica en la figura 17-5) la reflexión respecto al mismo no invierte el sentido de rotación. El resto del análisis no sufre alteración alguna. En esta cuenta negativa debe mencionarse la baja calidad de la reproducción de las figuras, que parecen simples fotocopias de las del texto original y que en algún caso resultan ilegibles (la de la pág. 232 incluso ha sido invertida). (A. M.)

Marine Ecology, por Jeffrey S. Levinton. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1982; 526 páginas. J. S. Levinton enseña ecología marina en la Universidad de Nueva York en Brook Haven, lo que explica el propósito didáctico de esta obra: facilitar a los estudiantes de los primeros cursos de oceanografía biológica y biología marina un texto básico y útil, donde encuentren abundantes ejemplos y orientadoras citas que representen las tendencias actuales. El libro se divide en seis apartados, que comprenden en total veintiún capítulos, con un resumen final de comentario, casi aforísmico, de los temas más interesantes.

Empieza por describir los océanos, desde el punto de vista morfológico y fisico-químico, los grandes modelos de circulación y los mecanismos de adaptación de los organismos marinos a cambios en las condiciones ambientales. Se introduce luego al alumno en la dinámica de poblaciones, el crecimiento, supervivencia, problemas de interacción (competencia, predación), estructura de los ecosistemas marinos (diversidad) y biogeografía, especiación y evolución. A ello siguen las modalidades de reproducción de los organismos marinos y los problemas de migración y dispersión de sus fases larvarias. Para ocuparse, por último, del estudio de los diferentes sistemas o hábitats marinos: sistema pelágico y bentos, sin descuidar los arrecifes coralinos.

El lector hallará también una lista de revistas científicas en lengua inglesa (sólo se incluye una francesa), un glosario de los términos científicos utilizados en el texto, un índice de materias y nombres científicos y una extensa bibliografía (alrededor de mil citas).

La voluntad manifestada en el prefacio de combinar los aspectos relativos al plancton y al bentos, y proporcionar así al estudiante una aproximación múltiple y objetiva de los problemas de la ecología marina, se consigue sólo en parte. De hecho, no solamente se aprecia cierto desequilibrio en la extensión de los diferentes apartados (la parte dedicada al estudio exclusivo del bentos viene a ocupar la mitad del libro, los apartados correspondientes a la descripción del medio y a la teoría ecológica comprenden una tercera parte y al plancton se dedica el resto), sino que la mayoría de los ejemplos elegidos para ilustrar los capítulos de autoecología, dinámica de poblaciones, etcétera, corresponden a organismos bentónicos.

Una visión algo estática de la ecología, con leves concesiones a la superficialidad en el tratamiento de temas de importancia general, como son los flujos de energía y materia y balance de nutrientes en el ecosistema, son, quizá, defectos imputables a este libro, cuidadosamente editado y en el que, aparte de la tendencia mencionada a destacar los aspectos relativos al bentos, la imparcialidad, o si se quiere, la visión ecléctica y neutra (características que tradicionalmente se han supuesto virtudes elogiables en todo libro de texto) son notas dominantes. (M. A.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LOS OBJETOS HERBIG-HARO

THE SPECTRA OF TWO NEBULOUS OBJECTS NEAR NGC1999. G. H. Herbig en *The Astrophysical Journal*, vol. 113, págs. 697-699; 1951.

HERBIG'S NEBULOUS OBJECTS NEAR NGC1999. G. Haro en *The Astrophysical Journal*, vol. 115, pág. 572; 1952.

INFRARED AND OPTICAL OBSERVATIONS OF HERBIG-HARO OBJECTS. S. E. Strom, G. L. Grasdalen y K. M. Strom en *The Astrophysical Journal*, vol. 191, págs. 111-142; 1974.

T TAURI NEBULAE AND HERBIG-HARO NEBULAE: EVIDENCE FOR EXCITATION BY A STRONG STELLAR WIND. R. D. Schwartz en *The Astrophysical Journal*, vol. 195, págs. 631-642; 1975.

CARBON MONOXIDE OBSERVATIONS OF R. MONOCEROTIS, NGC2261, AND HERBIG-HARO 39: THE INTERSTELLAR NOZZLE. J. Cantó, L. F. Rodríguez, J. F. Barral, P. Carral en *The Astrophysical Journal*, vol. 244, págs. 102-144; 1981.

HERBIG-HARO OBJECTS: RECENT OBSERVATIONAL AND THEORETICAL DEVELOPMENTS. J. Cantó, en *Investigating the Universe*, págs. 95-124. Astrophysics and Space Science Library, D. Reidel Publishing Company.

ASI SE PARTEN LOS CONTINENTES

PROPAGATING RIFTS ON MIDOCEAN RIDGES. Richard Hey, Frederick K. Duennebier y W. Jason Morgan en *Journal of Geophysical Research*, vol. 85, n.º 37, págs. 3647-3658; 10 de julio de 1980.

PROPAGATING RIFTS IN SEAFLOOR SPREADING PATTERNS. Tanya Atwater en *Nature*, vol. 290, n.º 5803, págs. 185-186; 19 de marzo de 1981.

PROPAGATING RIFT EXPLANATION FOR THE TECTONIC EVOLUTION OF THE NORTHEAST PACIFIC: THE PSEUDOMOVIE. R. N. Hey y D. S. Wilson en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 58, n.º 2, págs. 167-188; abril, 1982.

PROPAGATING RIFTS AND CONTINENTAL BREAKUP. V. Courtillot en *Tectonics*, vol. 1, págs. 239-250; junio, 1982.

PISCICULTURA DE LOS SALMONIDOS

THE ORIGIN AND SPECIATION OF ONCORHYNCHUS. F. Neave en *Transactions of the Royal Society of Canada*, vol. 3, 3.ª serie, 5.ª sección, págs. 25-39; junio, 1958.

FISH OF RARE BREEDING: SALMON AND TROUT OF THE DONALDSON STRAINS. Neal O. Hines. Smithsonian Institution Press, 1976.

SALMON RANCHING. Dirigido por J. E. Thorpe. Academic Press, 1980.

PROCEEDINGS OF THE SALMON AND TROUT MIGRATORY BEHAVIOR SYMPOSIUM. Dirigido por E. L. Brannon y E. O. Salo. Facultad de Pesquerías, Universidad de Washington, 1981.

EL APRENDIZAJE DE UN CARACOL MARINO

CALCIUM AND CYCLIC-AMP AS SYNARCHIC MESSENGERS. Howard Rasmussen. John Wiley & Sons, Inc., 1981.

CONDITIONING: REPRESENTATION ON INVOLVED NEURAL FUNCTIONS. Dirigido por Charles D. Woody. Plenum Press, 1982.

PRIMARY CHANGES OF MEMBRANE CURRENTS DURING RETENTION OF ASSOCIATIVE LEARNING. Daniel L. Alkon, Izja Lederhendler y Jonathan J. Shoukimas en *Science*, vol. 215, n.º 4533, págs. 693-695; 5 de febrero de 1982.

EMPAQUETAMIENTO MICROELECTRONICO

VLSI SUPPORT TECHNOLOGIES: COMPUTER-AIDED DESIGN, TESTING, AND PACKAGING. Dirigido por Rex Rice. IEEE Catalog No. EHO 191-7, IEEE Computer Society Press, 1982.

IBM 3081 SYSTEM DEVELOPMENT TECHNOLOGY. *IBM Journal of Research and Development*, vol. 26, n.º 1; enero, 1982.

IBM PACKAGING TECHNOLOGY. *IBM Journal of Research and Development*, vol. 26, n.º 3; mayo, 1982.

PAPERS ON MANUFACTURING TECHNOLOGY—PACKAGING. *IBM Journal of Research and Development*, vol. 27, número 1; enero, 1983.

DESARROLLO DE LAS HOJAS DE PALMERA

ANATOMY OF SEED PLANTS. Katherine Esau. John Wiley & Sons, Inc., 1977.

THE MECHANISM OF PLICATION INCEPTION IN PALM LEAVES: PROBLEM AND DEVELOPMENTAL MORPHOLOGY. Donald R. Kaplan, Nancy G. Dengler y Ronald E. Dengler en *The Canadian Journal of Botany*, vol. 60, págs. 2939-2975; 1982.

ALTERNATIVE MODES OF ORGANOGENESIS IN HIGHER PLANTS. Donald R. Kaplan en *Contemporary Problems in Plant Anatomy*, dirigido por William C. Dickinson y Richard A. White. Academic Press, en prensa.

PARTICULAS CON BELLEZA DESNUDA

OBSERVATION OF A FOURTH UPSILON STATE IN e^+e^- ANNIHILATIONS. D. Andrews et al. en *Physical Review Letters*, vol. 45, n.º 4, págs. 219-221; 28 de julio de 1980.

DECAY OF *b*-FLAVORED HADRONS TO SINGLE-MUON AND DIMUON FINAL STATES. K. Chadwick et al. en *Physical Review Letters*, vol. 46, n.º 2, págs. 88-91; 12 de enero de 1981.

EVIDENCE FOR NEW-FLAVOR PRODUCTION AT THE Y(4*S*). C. Bebek et al. en *Physical Review Letters*, vol. 46, n.º 2, págs. 84-87; 12 de enero de 1981.

OBSERVATION OF EXCLUSIVE DECAY MODES OF *b*-FLAVORED MESONS. S. Behrends et al. en *Physical Review Letters*, vol. 50, n.º 12, págs. 881-884; 21 de marzo de 1983.

LENGUAS CRIOLLAS

RULES AND REPRESENTATIONS. Noam Chomsky. Columbia University Press, 1980.

ROOTS OF LANGUAGE. Derek Bickerton. Karoma Publishers, Inc., Ann Arbor, 1981.

ISLE DE FRANCE CREOLE. Philip Baker y Chris Corne. Karoma Publishers, Inc., Ann Arbor, 1982.

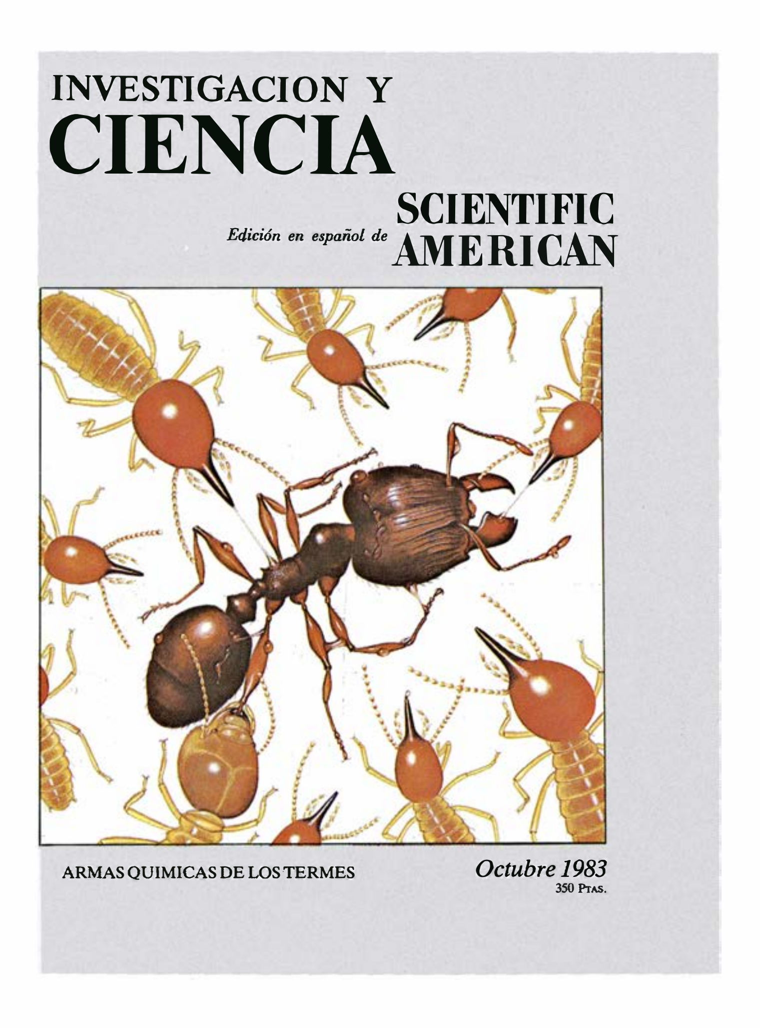
TALLER Y LABORATORIO

MECHANICS. Arnold Sommerfeld. Academic Press, 1964.

BYRNE'S TREASURY OF TRICK SHOTS IN POOL AND BILLIARDS. Robert Byrne. Harcourt Brace Jovanovich, Publishers, 1982.

THE DYNAMICS OF SPORTS: WHY THAT'S THE WAY THE BALL BOUNCIES. David F. Griffing. Mohican Publishing Company, 1982.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



PURIFICACION Y OBTENCION DE INTERFERONES HUMANOS, por Sidney Pestka
Sin que hayan satisfecho todas las esperanzas, se han aislado sus genes, que se han clonado en E. coli. *Las bacterias producen ya interferón en cantidades industriales, y se está sometiendo el producto a ensayos clínicos.*

CAMPOS MAGNETICOS DEL COSMOS, por E. N. Parker
El mecanismo que utiliza la dinamo para generar un campo magnético explica por qué Venus no tiene campo, por qué el del Sol es oscilante y por qué el campo galáctico dominante es paralelo al plano del disco galáctico.

LA MATERIA INTERESTELAR DE LOS METEORITOS, por Roy S. Lewis y Edward Anders
Las condritas carbonáceas, los meteoritos más primitivos, contienen materia originada fuera del sistema solar.

LAS DEFENSAS QUIMICAS DE LOS TERMES, por Glenn D. Prestwich
En su defensa, los termes soldados atacan a los invasores con un arsenal de sustancias irritantes, toxinas, anticoagulantes y colas.

ELECCION COLECTIVA RACIONAL, por Douglas H. Blair y Robert A. Pollak
El análisis axiomático de los sistemas de votación ha demostrado la compatibilidad de varias propiedades deseables en un método ideal.

LAS IGLESIAS NORUEGAS DE PIES DERECHOS, por Petter Aune, Ronald L. Sack y Arne Selberg
En el siglo x, los constructores noruegos mezclaron elementos paganos y cristianos en sus iglesias de madera. Algunas siguen en pie, lo que demuestra que los edificios de madera, correctamente diseñados y mantenidos, pueden ser permanentes.

TIPOGRAFIA DIGITAL, por Charles Bigelow y Donald Day
La mayoría de los tipos de letra no se producen por la fusión de algún metal ni por fotografía, sino mediante ordenadores.

QUIMICA EN FASE SOLIDA, por José Font
Los procesos químicos de laboratorio se basan en colisiones al azar de moléculas que se mueven libremente. Un nuevo método, en el que las moléculas se fijan a un soporte insoluble, es cada vez más usual.

